

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/ NH_4^+ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 朱兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

分层型水源水库沉积物需氧量特性

苏露, 黄廷林*, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家伟, 王晓江

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为探明分层型水源水库沉积物需氧量(SOD)特性及其影响因素, 选取西安金盆水库主库区上覆水体流速较低的库心区及流速较高的入库口两处沉积物进行对比实验, 估算水体不同扰动条件下沉积物需氧量, 利用 Biolog-Eco 平板和三维荧光光谱(EMMs)技术从底栖微生物群落代谢活性和沉积物有机质两方面对取样点沉积物需氧量的差异性进行分析. 结果表明, 静止条件下, 入库与库心沉积物在较高溶解氧时(约 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的沉积物面积需氧量 $\text{SOD}_{\text{Sarea}}$ 分别为 $0.13 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 库心约为入库的 2.69 倍. 动态条件下, 沉积物-水界面上覆水扰动增加使沉积物需氧量增加, 沉积物耗氧动力学由一阶动力学方程逐渐向零阶动力学方程转变. 入库与库心沉积物有机质含量分别为 $44.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $45.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 库心沉积物的可溶性有机质(DOM)的总荧光强度约为入库的 1.5 倍. 有机质含量更高的库心沉积物细菌群落代谢活性(以 AWCD 表征)更强, 表明高含量有机质和较强细菌代谢活性是引起库心沉积物需氧量大的主要因素. 将深层水库水体耗氧过程的研究结果与现有充氧曝气技术进行结合, 可为提高曝气器充氧效率提供科学依据.

关键词: 金盆水库; 沉积物需氧量; 有机质; 沉积物细菌代谢活性; Biolog-Eco; 三维荧光光谱

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1159-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201706141

Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir

SU Lu, HUANG Ting-lin*, LI Nan, ZHANG Hai-han, WEN Gang, LI Yang, CHEN Jia-wei, WANG Xiao-jiang
(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Depletion of dissolved oxygen (DO) in the hypolimnetic layer during stratification periods and its deleterious effects on water quality have been widely observed. However, it is still difficult to comprehend conceptually the processes of oxygen consumption at the sediment-water interface. The research presented here is, therefore, based on an areal hypolimnetic oxygen demand (AHOD) model to address three key themes related to the sediment oxygen demand (SOD): ① the characteristics of sediment and its influences on SOD; ② evaluation of SOD with different turbulence levels overlying the sediment; and ③ the influence of microbial metabolic activity on SOD. Sediment samples were collected at the entrance to and over the basin area of Jinpen Reservoir, and a sediment-water experimental chamber was designed to achieve these goals. The results showed that, under quiescent conditions, the $\text{SOD}_{\text{Sarea}}$ (SOD at DO of $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) were $0.13 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ in the arm and basin, respectively. Under dynamic conditions, the slight mixing of the water column near the sediment induced an increase in SOD and resulted in a gradual shift from first-order to zero-order DO uptake. The organic matter content in the reservoir arm and profundal sediment were $44.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $45.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. The microbial metabolic activity in the basin was stronger, and the total fluorescence intensity of the dissolved organic matter (DOM) in the profundal sediments was about 1.5 times that in the reservoir arm. These results suggest that SOD will be higher when microbial metabolic activity is stronger and organic matter content is higher in sediments. The oxygenation aeration techniques should be designed to meet the oxygen demand of the deep reservoir to provide a theoretical basis for improving the oxygenation efficiency.

Key words: Jinpen Reservoir; sediment oxygen demand; organic matter; microbial metabolic activity in sediment; Biolog-Eco; EMMs

水库已逐渐成为城市的重要饮用水资源, 水源水库(湖泊)水质污染与富营养化控制理论及技术的研究成为近年的热点课题. 对于大型深层水源水库, 水体热分层等所谓“湖沼学反应”控制着水体中诸多生物、化学和物理过程^[1], 由热分层造成的等温层缺氧现象使沉积物中营养物质向水体释放, 加速了水体富营养化进程, 导致水质恶化^[2~4]. 例如, 我国贵州百花水库、陕西黑河金盆水库、山东周村水库等, 均因为水库底部缺氧, 沉积物向水体中释放重金属等还原性物质, 出现氮、磷、铁、硫化物等指标浓度变高, 鱼类死亡等问题^[4~6].

等温层缺氧的主要原因有: 夏季分层期间, 斜温层极大地增加了表层大气复氧对底部水体的氧传质阻力; 底栖生物的呼吸作用、微生物对死亡藻类、浮游生物及沉积物中有机物质的有氧降解进一步加强了底部水体溶解氧的消耗^[7]. 在等温层曝气系统中, 等温层需氧量(hypolimnetic oxygen demand, HOD)被认为是重要的设计参数, 但只依

收稿日期: 2017-06-14; 修订日期: 2017-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478378)

作者简介: 苏露(1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为水处理与微生物污染控制, E-mail: sululu2611@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

靠溶解氧的检测数据来预估等温层所需的氧气量并不准确^[8],因为在曝气系统运行后,实际需氧量会增大^[9].因此,如何正确地预估等温层需氧量,合理设计曝气系统,是高效改善水质的重要途径.

目前国内外对解决等温层缺氧问题的研究已由单一的增加水体溶解氧浓度转变为对沉积物需氧量(sediment oxygen demand, SOD)的精确估算.对内华达州沃克湖的 SOD 研究表明,在沉积物-水界面连续的水流会导致 SOD 大幅增加[以 O_2 计,增加 $0.38 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]^[10]; Josiam 等^[11]探究了 SOD 与水流速度的关系,结果表明:随着水流速度增加, SOD 达到上限,其上限与沉积物性质、底栖生物和温度有关; Todd 等^[12]对 68 处河湖沉积物的研究发现,沉积物耗氧速率与有机质含量有显著关系,有机质含量高使沉积物耗氧速率增加约 18 倍; Rong 等^[13]对子牙河流域 SOD 的研究表明,生物作用产生的 SOD 占总 SOD 的 41.13%; Rippey 等^[14]在对 32 个湖泊的探究中发现,沉积物的需氧量受沉积物中新鲜有机物质和温度多变性的影响呈现季节性变化.

本文以西安市黑河金盆水库为研究对象,取库心和入库两个位置沉积物做对比实验,在实验室建立反应器,探究了在不同混合程度、不同沉积物性质条件下沉积物的耗氧特性,分析了分层型水源水库沉积物需氧量(SOD)及其影响因素,以期为水库现有的充氧曝气技术提高曝气器充氧效率、优化及改进提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及采样点选择

黑河金盆水库位于陕西省西安市周至县境内(图1),坝址流域面积 1481 km^2 ,总库容 2.0 亿 m^3 ,平均水深 $70 \sim 100 \text{ m}$,日供水量 80 万 m^3 ,是一座以城市供水为主,兼有防洪、发电、灌溉等综合效益的大型水利枢纽工程,于 2002 年建成供水.黑河金盆水库属于深水型水库,夏季形成稳定的分层,等温层长年温度变化较小,主库区呈 S 弯型,水深大,水体停留时间长^[15,16],结合地形和径流特点,选取具有代表性的主库区上覆水体流速较低的库心区(靠近引水塔)S1 及流速较高的入库口 S2 为取样点.

1.2 样品采集及反应器建立

2016 年 8 月,在金盆水库进行样品采集,此时水库处于稳定的分层状态.利用彼得森抓斗式采样

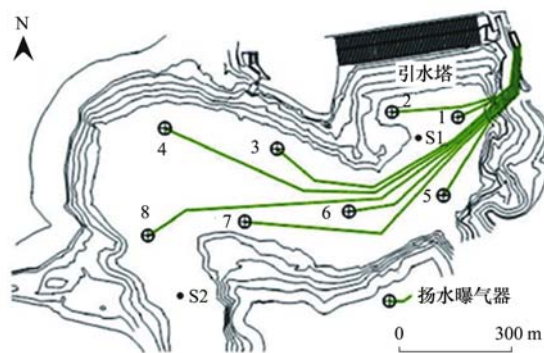


图1 金盆水库主库区采样点及扬水曝气器布置点示意

Fig. 1 Sampling sites and layout of water-lifting aerators in Jinpen Reservoir

器采集各采样点的沉积物样品,每个采样点取泥 3 次,将 3 次取得的泥样混匀作为该点沉积物样品,同时采集沉积物上层的上覆水,在现场小心移入反应器中^[17].

反应器(图2)为 $24 \text{ cm} \times 24 \text{ cm}$ 有机玻璃圆柱体,上部由法兰加压连接后,用玻璃胶密封.反应器中部密封便携式溶解氧探头,测定不同混合条件下的溶解氧浓度.两端设置进水口与出水口,进出口由内径为 4.8 mm 泵管连接,外设蠕动泵提供循环流量.装置底部铺设约 5 cm 状态完好的沉积物,蠕动泵进水口位于沉积物表面以上 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 处,水流方向与沉积物表面保持水平.装置反应前将上覆水导出,曝气至饱和,用虹吸管将富氧水重新注入反应器.静置一到两天后,将上部水体导出并曝气后,重新导入装置并开泵循环(不引起沉积物再悬浮),直至溶解氧达到饱和后,密封反应器,调节循

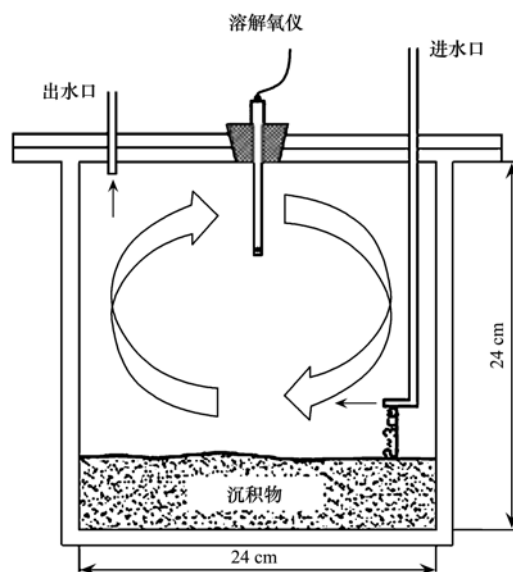


图2 反应器原理示意

Fig. 2 Schematic of experimental sediment-water chamber

环流量, 进行实验. 实验分别在 3 个不同流速条件下进行: 静止(不加泵), 中度混合(加泵, 流速约 $8 \sim 9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), 高度混合(加泵, 流速约 $11 \sim 12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). 实验温度恒定为 12°C , 避光培养.

1.3 分析方法

从现场采集沉积物, 装入 100 mL 离心管中, 再将其放入保温泡沫盒(覆冰袋)立即带回实验室保存(-25°C), 进行冷冻干燥后过 200 目尼龙筛网. 沉积物的有机质用重铬酸钾外加加热法测定^[18]; 蛋白质含量用 Lowry 法测定^[19]; 总糖含量用苯酚-硫酸法测定^[20]; 总脂含量用甲醇-氯仿法测定^[21], 每个样品 3 次重复(日本岛津, 紫外-可见分光光度计, UVmini-1240). 沉积物细菌群落代谢活性采用 Biolog-Eco 平板法测定(BIOLOG GEN III MicroStation, 美国 BIOLOG)^[22~24]. 沉积物可溶性有机质(DOM)采用三维荧光光谱法-平行因子分析法(EEMS-PAR AFAC)^[25,26]测定(日立 F-7000 荧光分光光度计, 日本). 反应器中溶解氧浓度用荧光法测量(HQ30d 便携式分析仪, 美国 HACH 公司).

1.4 需氧量计算

反应器内沉积物需氧量(SOD)采用公式(1)计算.

$$\text{SOD} = \text{HOD} - \text{WOD} \quad (1)$$

式中, SOD 为沉积物需氧量 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$]; HOD 为等温层需氧量, 由反应器中测得溶解氧随时间变化关系得出 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$]; WOD (water oxygen demand) 为水体需氧量 [$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$].

采用 BOD 瓶测得水体耗氧速率, 水体需氧量(WOD)符合零阶动力学^[10], 其计算见公式(2).

$$\text{WOD} = \Delta c_0 / \Delta t_0 \quad (2)$$

式中, Δc_0 为溶解氧变化量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Δt_0 为时间变化量 (d); $\Delta c_0 / \Delta t_0$ 为 BOD 瓶中溶解氧随时间的

变化关系曲线的斜率 K_0 , 即 WOD 为拟合零阶动力学方程的斜率 K_0 .

反应器中溶解氧随时间的变化关系符合零阶动力学时, 沉积物需氧量(SOD)为计算公式(3).

$$\text{SOD} = \Delta c / \Delta t - \text{WOD} \quad (3)$$

式中, $\Delta c / \Delta t$ 为反应器溶解氧随时间的变化关系方程的斜率 K .

若符合一阶反应动力学情况, SOD 则为计算公式(4).

$$\text{SOD} = K_1 \times \text{DO} - \text{WOD} \quad (4)$$

式中, K_1 为溶解氧随时间的变化拟合的指数方程中自然数指数的系数; DO 为反应器中当前溶解氧浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 此时的 SOD 与反应器中溶解氧浓度有关, 定义溶解氧为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的沉积物面积需氧量估算值为 $\text{SOD}_{\text{Sarea}}$ [$\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 将单位体积需氧量转化为单位面积表示的通量, 见公式(5).

$$\begin{aligned} \text{SOD}_{\text{Sarea}} &= (5 \times K_1 - \text{WOD}) \times V/A \\ &= (5 \times K_1 - \text{WOD}) \times H \end{aligned} \quad (5)$$

式中, V 为反应器中水的体积 (m^3); A 为沉积物表面面积 (m^2); H 为反应器中水体厚度 (m).

2 结果与讨论

2.1 等温层需氧量

静态实验中, 两个取样点的需氧量测定结果如图 3 所示, K_0 为零阶动力学方程的斜率, K_1 为一阶动力学方程中自然数指数的系数.

两个取样点的水体需氧量测定结果表明, BOD 瓶中溶解氧浓度随时间变化的关系呈零阶反应动力学方程关系, WOD 为反应方程斜率. 反应器中溶解氧随时间变化关系曲线表明: ①等温层需氧量(HOD)均符合一阶反应动力学方程, 溶解氧浓度下降与时间呈指数关系, 某时刻溶解氧消耗量与该时

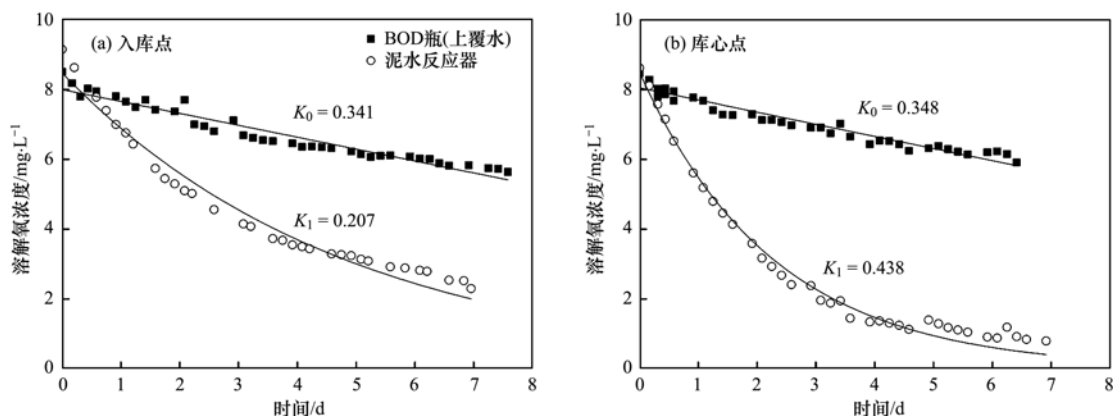


图 3 反应器中水体溶解氧随时间变化关系

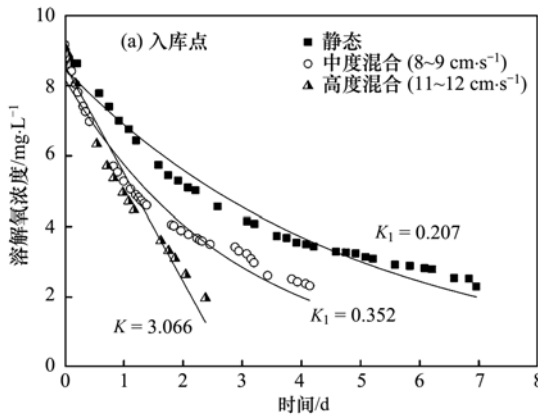
Fig. 3 Dissolved oxygen concentration changes over time in the chamber

刻反应器内溶解氧浓度有关;②两个反应器中溶解氧浓度随着时间的增加而降低. 在高溶解氧($DO > 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)状态下, 反应器中溶解氧消耗速度快, 随着反应器中溶解氧浓度的降低, 溶解氧消耗速度变缓.

对于静止条件, WOD 可由公式(2)计算, 此时反应器中上覆水溶解氧(DO)消耗速率与 DO 浓度相关, 静止条件下的 SOD 可利用公式(4)、(5)分别算出, 结果见表 1.

表 1 2 个采样点需氧量计算结果

采样点	WOD	SOD ₅	SOD _{5area}
	$/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	$/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	$/\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
入库点	0.34	0.69	0.13
库心点	0.35	1.84	0.36



两个取样点的 SOD 均大于 WOD, 约为 2 ~ 6 倍, 并且在 DO 浓度较高时沉积物对氧气消耗量明显大于水体, 说明等温层中溶解氧的降低主要是由于沉积物对氧气的消耗. 也有研究认为, 当积累的有机物质穿过变温层到达等温层时, 等温层水体对其的分解作用会导致 WOD 的增加, 使沉积物上层水体缺氧, 在此阶段 SOD 会一定程度变小^[27].

2.2 沉积物-水界面上混合强度及上覆水溶解氧浓度对 SOD 的影响

为了探究 SOD 的影响因素, 进行不同流速的动态实验. 反应装置中安装蠕动泵, 给水流提供一定流速, 一方面对反应器内水体进行混合, 另一方面在泥水界面处扰动. 调节流速大小, 测定不同水流速度的反应器中溶解氧浓度(结果见图 4).

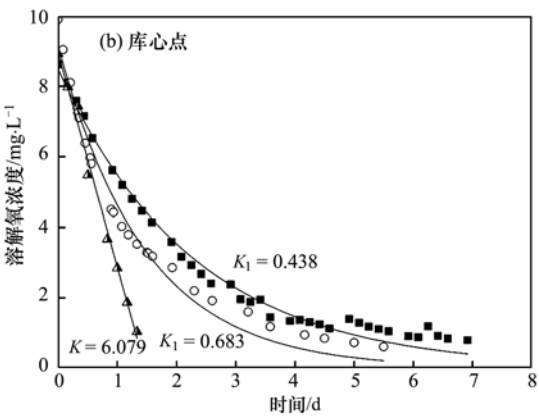


图 4 入库点与库心点不同混合实验中反应器溶解氧随时间变化关系

Fig. 4 Dissolved oxygen concentration changes over time in the chamber for reservoir arm and profundal sediment under different mixing conditions

2.2.1 沉积物-水界面混合强度对 SOD 的影响

从溶解氧浓度与时间关系曲线图(图 4)可看出, 随着水流速度的增大, 溶解氧浓度随时间的变化关系由一阶动力学逐渐向零阶动力学转变. SOD 随着沉积物-水界面上流速的增大而显著增大, 混合扰动对 SOD 的影响明显. 其他相似研究也验证了沉积物上覆水体混合对 SOD 的影响: 对华盛顿州的一个富营养化湖泊的研究表明, 混合程度增加对 SOD 的影响更大, 当流速为 $2 \sim 3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, SOD 达到静态的 3 倍, 当流速增加到 $8 \sim 10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, SOD 达到了 4 倍^[9]. 分析原因为: 沉积物-水界面的水体流速变大, 使扩散边界层厚度减小, 同时传质增加^[28], 溶解氧的扩散限制变小^[11]; 沉积物-水界面静止的水层为阻碍上覆水中溶解氧进入沉积物的屏障^[29], 沉积物界面处的水流速越大, 混合程度越大, SOD 也随之增大, 但是 SOD 存在上限值^[30].

反应器内对水体的混合等同于水库中曝气系统

对等温层的混合, 混合作用增加了沉积物需氧量, 即在曝气系统运行条件下相比于无曝气系统时等温层需氧量会增大, Gerling 等^[31]的研究也证实了曝气系统运行后存在曝气诱导需氧量, 使等温层需氧量大于原等温层需氧量.

2.2.2 上覆水 DO 浓度对 SOD 的影响

反应器中溶解氧消耗以溶解氧浓度随时间变化来表征: 符合零阶反应动力学时, SOD 为一定值, 不受 DO 浓度的影响, 此时 SOD 可理解为上限值; 符合一阶反应动力学时, 其 SOD 与当前 DO 浓度相关, DO 浓度为沉积物氧气消耗速率的主要控制因素. 水体向沉积物传递溶解氧的主要驱动力为浓度差, 而混合作用压缩了扩散边界层, 浓度差越大水体中溶解氧的传递越强^[28].

随着溶解氧浓度降低, $DO < 3 \sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, DO 消耗变缓(图 4), 相应的 SOD 变小. 有大量的研究认为, 降低水体中的溶解氧浓度可达到降低等

温层或沉积物-水界面的氧气消耗速率，上覆水中 DO 的降低与 SOD 的降低存在线性关系^[32]，且当溶解氧浓度降低至 3~4 mg·L⁻¹时，HOD 也减少^[33]。

2.3 不同采样点沉积物需氧量差异性分析

两个取样点在静态和动态实验中 DO 浓度随时间变化中均表现出差异性：静态实验中，库心点的 SOD₅ 约为入库点的 2.69 倍；动态实验中，混合程度相同的情况下，库心点的 SOD₅ 均约为入库点 SOD₅ 的 2 倍(表 2)。因此，对于不同位置出现 SOD 的差异，进行沉积物有机质与细菌代谢活性分析。

表 2 混合条件下 2 个采样点沉积物需氧量
计算结果/g·(m²·d)⁻¹

Table 2 Sediment oxygen demand for two sampling sites with mixing/g·(m ² ·d) ⁻¹			
采样点	静止(流速 0 cm·s ⁻¹)	中度混合(流速 8~9 cm·s ⁻¹)	高度混合(流速 11~12 cm·s ⁻¹)
入库	0.13	0.28	0.55
库心	0.36	0.61	1.15

2.3.1 沉积物有机质分析

(1) 活性有机碳数据

有研究表明，底泥中的有机质影响着营养盐的释放，某些有机质在水生态环境中可快速地转化和降解^[34]，同时发生的矿化作用大量消耗氧气，改变 pH、氧化还原电位等^[35,36]，是 SOD 的重要影响因素。沉积物有机质成分复杂，易降解的有机成分从

生物化学的角度主要为：总糖、总脂、蛋白质^[37]。两个研究点的沉积物有机质的测定结果见表 3。从结果可知，库心沉积物的有机质及其主要成分含量均大于入库沉积物：库心沉积物总糖、总脂、蛋白质的含量分别为入库沉积物的 1.19、1.23、1.35 倍。此结果也说明了有机质是使库心与入库 SOD 存在差异性的原因之一。

表 3 沉积物中有机质主要成分含量¹⁾/mg·g⁻¹

Table 3 Main content of organic matter in sediment/mg·g ⁻¹				
采样点	沉积物有机质分析			
	有机质	总糖	总脂	蛋白质
入库	44.43±0.23	1.31±0.03	1.75±0.02	3.57±0.04
库心	45.12±0.16	1.56±0.03	2.16±0.01	4.85±0.05

1)表中数据均为样品的平均值±标准误差(n=3)

(2) 有机质三维荧光分析

根据 PARAFAC 模型可辨识出金盆水库两个采样点沉积物可溶性有机质(DOM)有 2 个荧光组分，分别为 C1(255/430 nm)和 C2(265,270/530 nm)，均为类腐殖质(HS)^[38]，其中 C1 为富里酸^[39,40]，C2 为胡敏酸^[26,41](图 5)。一般情况下，用总荧光强度来表征 DOM 的浓度高低，通过对比得出：库心沉积物的 DOM 的总荧光强度约为入库沉积物的 1.5 倍，其中胡敏酸在库心沉积物中的总荧光强度为入库沉积物的 2.2 倍，说明入库沉积物的 DOM 含量小于库心沉积物(可溶性有机碳浓度相同)。此结果

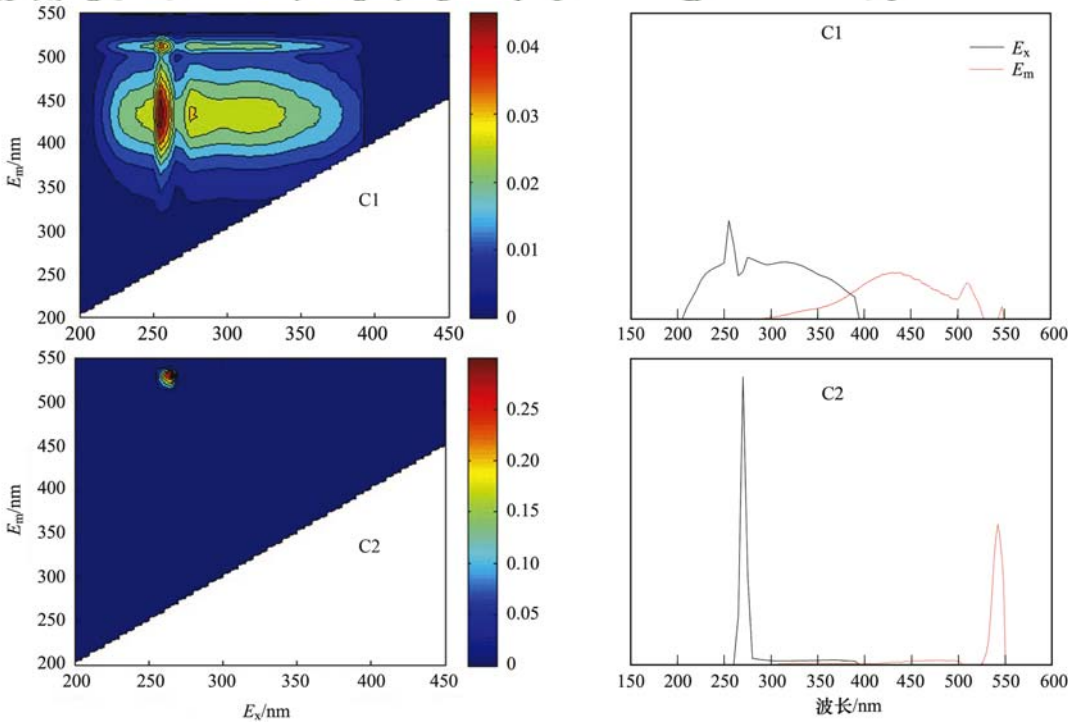


图 5 PARAFAC 解析出的黑河水库沉积物 2 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 5 Fluorescence spectra of two previously identified PARAFAC components from Jinpen Reservoir sediment

进一步说明有机质对 SOD 存在较大影响。

2.3.2 细菌代谢活性分析

(1) 沉积物微生物整体代谢活性

微生物对单一碳源的利用强度可由平均每孔颜色变化率(AWCD)来表征,即 Biolog-Eco 测试板孔溶液吸光值平均变化率,它是微生物群落多样性的一个重要指标,可有效反映微生物的代谢活性^[42]。在 240 h 的培养时间内(图 6):入库点在 192 h 内,AWCD 持续快速增加,此时微生物不断适应环境呈指数增长趋势,192 h 后,AWCD 缓慢增加,进入稳定期;库心点在 144 h 内,AWCD 持续快速增加,而后进入稳定期。库心点的 AWCD 值明显高于入库点,库心沉积物微生物群落对底物碳源的利用能力更强,说明库心沉积物中微生物的活性和功能多样性高于入库。

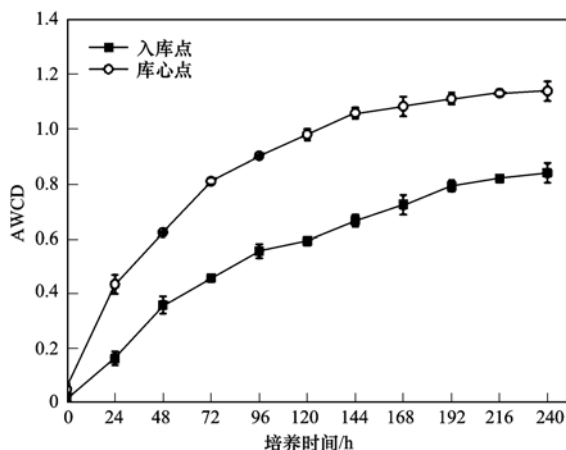


图 6 不同取样点沉积物细菌群落代谢活性

Fig. 6 Average well color development (AWCD) of sediment samples at different sampling sites

(2) 沉积物微生物群落对不同碳源的利用程度

Biolog-Eco 板中含有 31 种不同类型的碳源,主要分为 6 大类,图 7 为不同取样点沉积物微生物对碳源的利用结果。从碳源利用角度分析,入库沉积物中微生物对胺类的利用率最高(27.97%),其次为氨基酸类(23.42%),对糖类和酯类的利用程度相对较低(13.66%、16.11%),而醇类与酸类的利用程度最低(9.28%、9.56%)。

相对入库点而言,除胺类以外,库心沉积物微生物对碳源的利用程度均高于入库点,糖类、氨基酸类及酯类等提高了 3.75%~136.96%。库心点沉积物微生物对氨基酸类利用程度最高(18.72%),对糖类的利用程度最低(13.04%)。以上结果表明,库心点微生物对碳源的利用程度更高,微生物对碳源的利用能力更强。

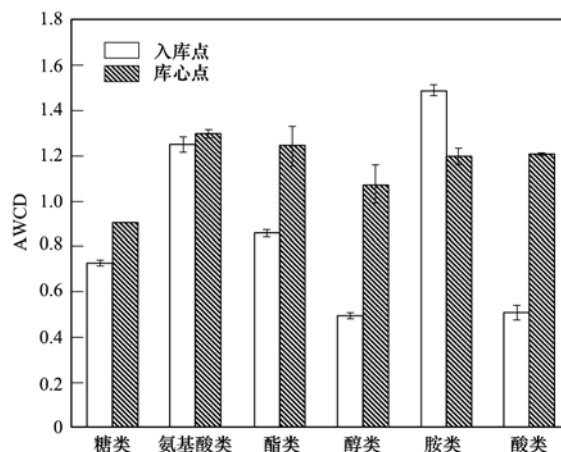


图 7 不同取样点沉积物细菌群落对六大碳源的利用程度

Fig. 7 Relative use efficiency of six carbon sources by the microbial community in sediments at different sampling sites

(3) 沉积物微生物群落多样性指数分析

多样性指数可反映沉积物生物群落利用碳源类型的多少,Shannon 指数(H)用来表征微生物群落的丰富度,Simpson 指数(D)反映群落中某些常见种的优势度,McIntosh 指数(U)代表群落物种的均匀度^[43]。表 4 为取样点沉积物微生物多样性指数,可明显看出与入库沉积物微生物相比,库心沉积物中微生物群落种类更丰富,均匀度更高,但两个取样点沉积物的微生物优势度指数差别不大。

表 4 沉积物细菌群落碳源代谢多样性指数¹⁾

取样点	Shannon 指数(H)	Simpson 指数(D)	McIntosh 指数(U)
入库	2.89 ± 0.23	0.93 ± 0.02	4.02 ± 1.71
库心	3.26 ± 0.22	0.95 ± 0.02	4.94 ± 1.88

1) 表中数据为平均数 ± 标准(偏)差, $n = 3$

微生物活性研究结果表明:库心沉积物微生物活性强于入库沉积物微生物,微生物群落结构是不同的,其原因可能是由沉积物理化性质的差异性引起的^[44]。库心沉积物中有机物丰富,使微生物群落结构复杂、多样性更丰富,活性更大,从而具有较大的沉积物需氧量。Higashino 等^[45,46]的相关研究也验证了微生物对 SOD 有重要影响:不考虑流速影响时,沉积物中生物量越大,SOD 越大;SOD 可表示为微生物生长速率的函数。

3 结论

(1) 静止条件下,沉积物需氧量约为水体需氧量的 2~6 倍,并且在 DO 浓度较高时沉积物对氧气消耗量明显大于水体,等温层中溶解氧的降低主要是由于沉积物对氧气的消耗。

(2) 沉积物-水界面上方水体混合作用使扩散边界层被压缩, 导致水体向沉积层的传质作用增强, 同一位置的 SOD 变大, 但存在上限值; 当混合流速由 $0 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $11 \sim 12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 入库 $\text{SOD}_{\text{Sarea}}$ 由 $0.13 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 增大至 $0.55 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 库心 $\text{SOD}_{\text{Sarea}}$ 由 $0.36 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 增大至 $1.15 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 随着流速的增加, SOD 由一阶动力学方程逐渐向零阶动力学方程转变; 当混合程度一定时, 上覆水溶解氧浓度越高, 相应的 SOD 值越大.

(3) 外界条件相同时, 库心的 SOD 均大于入库, 不同位置的 SOD 受到沉积物自身性质和微生物活性等因素的影响. 入库与库心沉积物有机质含量分别为: $44.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $45.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 库心沉积物的 DOM 的总荧光强度约为入库沉积物的 1.5 倍; 除胺类以外, 库心沉积物中微生物对碳源的利用程度均高于入库点, 糖类、氨基酸类及酯类等利用程度提高了 $3.75\% \sim 136.96\%$, 入库与库心沉积物微生物群落 Shannon 指数(H) 分别为: 2.89、3.26. 结果表明微生物作用越强、有机质含量越高的沉积物需氧量越大.

参考文献:

- [1] Saito L, Johnson B M, Bartholow J, *et al.* Assessing ecosystem effects of reservoir operations using food web-energy transfer and water quality models[J]. *Ecosystems*, 2001, **4**(2): 105-125.
- [2] 卢金锁, 李志龙. 热分层对水库水质的季节性影响——以西安黑河水库为例[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(5): 698-706.
Lu J S, Li Z L. Seasonal effects of thermal stratification on the water quality of deep reservoirs: a case study of Heihe Reservoir, Xi'an City[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 698-706.
- [3] 夏品华, 林陶, 李存雄, 等. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(9): 1477-1485.
Xia P H, Lin T, Li C X, *et al.* Features of the water column stratification and the response of water quality of Hongfeng reservoir in Guizhou, China[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(9): 1477-1485.
- [4] 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 等. 我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
Zeng M Z, Huang T L, Qiu X P, *et al.* Seasonal stratification and the response of water quality of a temperate reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1337-1344.
- [5] 马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征[J]. *水利学报*, 2013, **44**(4): 406-415.
Ma Y, Guo Q L, Huang T L, *et al.* Response characteristics of water quality to the seasonal thermal stratification in Jin-pen reservoir along the Heihe river, Xi'an city in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(4): 406-415.
- [6] 王雨春, 朱俊, 马梅, 等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(1): 54-60.
Wang Y C, Zhu J, Ma M, *et al.* Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a Canyon-Reservoir, southwestern China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, **17**(1): 54-60.
- [7] Beutel M, Hannoun I, Pasek J, *et al.* Evaluation of hypolimnetic oxygen demand in a large eutrophic raw water reservoir, San Vicente Reservoir, Calif [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, **133**(2): 130-138.
- [8] Soltero R A, Sexton L M, Ashley K I, *et al.* Partial and full lift hypolimnetic aeration of medical lake, WA to improve water quality[J]. *Water Research*, 1994, **28**(11): 2297-2308.
- [9] Moore B C, Chen P H, Funk W H, *et al.* A model for predicting lake sediment oxygen demand following hypolimnetic aeration [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1996, **32**(4): 723-731.
- [10] Beutel M W. Oxygen consumption and ammonia accumulation in the hypolimnion of Walker Lake, Nevada [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **466**(1-3): 107-117.
- [11] Josiam R M, Stefan H G. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: comparison of theory and experiments [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, **35**(2): 433-439.
- [12] 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.
- [13] Rong N, Shan B Q. Total, chemical, and biological oxygen consumption of the sediments in the Ziya River watershed, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(13): 13438-13447.
- [14] Rippey B, Mesorley C. Oxygen depletion in lake hypolimnia[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(3): 905-916.
- [15] 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 Z, Huang T 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.
- [16] 马越, 黄廷林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用[J]. *给水排水*, 2012, **38**(4): 7-13.
Ma Y, Huang T L, Cong H B, *et al.* Application of the technology of water-lifting and aeration on water quality in-situ restoration in a deep channel reservoir[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, **38**(4): 7-13.
- [17] Beutel M W, Cox S E, Gebremariam S. Effects of chironomid density and dissolved oxygen on mercury efflux from profundal lake sediment[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2016, **32**(2): 158-167.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] Mayer L, Schick L L, Setchell F W. Measurement of protein in nearshore marine sediments[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 1986, **30**(2-3): 159-165.

- [20] 姜琼, 谢好. 苯酚-硫酸法测定多糖方法的改进[J]. 江苏农业科学, 2013, **41**(12): 316-318.
- [21] Frostegård Å, Tunlid A, Bååth E. Microbial biomass measured as total lipid phosphate in soils of different organic content[J]. Journal of Microbiological Methods, 1991, **14**(3): 151-163.
- [22] Rutgers M, Wouterse M, Drost S M, *et al.* Monitoring soil bacteria with community-level physiological profiles using Biolog? ECO-plates in the Netherlands and Europe[J]. Applied Soil Ecology, 2016, **97**: 23-35.
- [23] Guo P P, Zhu L S, Wang J H, *et al.* Effects of alkyl-imidazolium ionic liquid [Oim]Cl on the functional diversity of soil microbial communities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(12): 9059-9066.
- [24] Choi K H, Dobbs F C. Comparison of two kinds of Biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities[J]. Journal of Microbiological Methods, 1999, **36**(3): 203-213.
- [25] Ohno T, Bro R. Dissolved organic matter characterization using multiway spectral decomposition of fluorescence landscapes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, **70**(6): 2028-2037.
- [26] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- Huang T L, Fang K K, Zhang C H, *et al.* Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter from Zhoucun Reservoir in summer based on fluorescence spectroscopy and PARAFAC[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- [27] Gantzer P A, Bryant L D, Little J C. Effect of hypolimnetic oxygenation on oxygen depletion rates in two water-supply reservoirs[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1700-1710.
- [28] Müller B, Bryant L D, Matzinger A, *et al.* Hypolimnetic oxygen depletion in eutrophic lakes[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(18): 9964-9971.
- [29] Jørgensen B B, Revsbech N P. Diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediments and detritus[J]. Limnology and Oceanography, 1985, **30**(1): 111-122.
- [30] Mackenthun A A, Stefan H G. Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: experimental results[R]. Minneapolis: University of Minnesota, 1995.
- [31] Gerling A B, Browne R G, Gantzer P A, *et al.* First report of the successful operation of a side stream supersaturation hypolimnetic oxygenation system in a eutrophic, shallow reservoir[J]. Water Research, 2014, **67**: 129-143.
- [32] Hargrave B T. Similarity of oxygen uptake by benthic communities[J]. Limnology and Oceanography, 1969, **14**(5): 801-805.
- [33] Ellis C R, Stefan H G. Oxygen demand in ice covered lakes as it pertains to winter aeration[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, **25**(6): 1169-1176.
- [34] Chase J M. Are there real differences among aquatic and terrestrial food webs[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, **15**(10): 408-412.
- [35] 张润宇, 吴丰昌, 王立英, 等. 太湖北部沉积物不同形态磷提取液中有机的特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 733-742.
- Zhang R Y, Wu F C, Wang L Y, *et al.* Characteristics of organic matter in different extractions of phosphorus forms in sediments in north part of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 733-742.
- [36] D'Angelo E M, Reddy K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: I. distribution of dissolved nutrients in the soil and water column[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, **23**(5): 928-936.
- [37] 何延召, 柯凡, 冯慕华, 等. 巢湖表层沉积物中生物易降解物质成分特征与分布规律[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 40-49.
- He Y Z, Ke F, Feng M H, *et al.* Characteristics and distribution of biodegradable compounds of surface sediments in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(1): 40-49.
- [38] Koivula N, Hänninen K. Concentrations of monosaccharides in humic substances in the early stages of humification[J]. Chemosphere, 2001, **44**(2): 271-279.
- [39] 贾陈忠, 王焰新, 张彩香, 等. 垃圾渗滤液中溶解性有机物组分的三维荧光特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(6): 1575-1579.
- Jia C Z, Wang Y X, Zhang C X, *et al.* 3D-EEM fluorescence characteristics of different fraction of dissolved organic matter in landfill leachate[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, **32**(6): 1575-1579.
- [40] 何莉, 吉芳英, 来铭笙, 等. 径流污染对城市污水处理过程的 DOM 荧光特性影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(3): 663-667.
- He L, Ji F Y, Lai M S, *et al.* The influence of runoff pollution to DOM features in an urban wastewater treatment plant[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, **35**(3): 663-667.
- [41] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [42] Salomo S, Münch C, Rüske I. Evaluation of the metabolic diversity of microbial communities in four different filter layers of a constructed wetland with vertical flow by BiologTM analysis[J]. Water Research, 2009, **43**(18): 4569-4578.
- [43] Fang H, Yu Y L, Chu X Q, *et al.* Degradation of chlorpyrifos in laboratory soil and its impact on soil microbial functional diversity[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(3): 380-386.
- [44] 王亚平, 黄廷林, 周子振, 等. 黑河金盆水库表层沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(10): 1977-1983.
- Wang Y P, Huang T L, Zhou Z Z, *et al.* Forms and distribution of phosphorus in surface sediments of Jinpen Reservoir[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(10): 1977-1983.
- [45] Higashino M, Stefan H G. Sedimentary microbial oxygen demand for laminar flow over a sediment bed of finite length[J]. Water Research, 2005, **39**(14): 3153-3166.
- [46] Higashino M. Quantifying a significance of sediment particle size to hyporheic sedimentary oxygen demand with a permeable stream bed[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2013, **13**(3): 227-241.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria spiralis</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Flocculation-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)