

文章编号:1673-9468(2008)04-0056-05

## 污染河流治理与修复技术现状及展望

苏冬艳,崔俊华,晁 聪,张建辉,王培宁  
(河北工程大学 城建学院,河北 邯郸 056038)

**摘要:**对河流治理与修复技术进行了综述,将其归纳为物理、化学、生物修复技术三大类:物理技术包括人工曝气、引水冲污、底泥疏浚;化学技术包括化学除藻、重金属固定;生物修复技术包括微生物强化、植物强化、生物膜法。对每种技术的研究现状进行了简介和评价,并展望了这三类技术今后的发展方向。

**关键词:**河流污染治理;修复技术;物理技术;化学技术;生物修复技术

中图分类号: X522

文献标识码: A

### Present situation and prospect for treatment and repairing technology of polluted river

SU Dong-yan, CUI Jun-hua, CHAO Cong, ZHANG Jian-hui, WANG Pei-ning  
(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In this paper the treatment and repairing technology of polluted river was summarized, which were physical, chemical and bioremediation technologies; physical techniques include artificial aeration, polluted watercourse flushing, sediment dredging; chemical techniques include chemical alga-killing, heavy-metal fixer; bioremediation techniques include microorganism str-engthen, plant strengthening, biofilm process. These techniques are briefly included and evaluated. The future developments of these technologies are prospected.

**Key words:** polluted river treatment; repairing technology; physical technique; chemical technique; bioremediation technique

水是人类最宝贵的一种自然资源,最早的人类文明都是沿着河流和河谷发展起来的。正因为河流对人类的重要作用,河流的治理以及当前河流面临的问题也倍受瞩目。人类对河流进行了各种方式的改造和开发利用,使河流发挥了巨大的社会功能和经济功能,但同时也使河流生态系统受到严重破坏。2004年1月,联合国环境计划署组织的“面向21世纪的世纪水资源委员会”总结的调查报告指出,世界大江大河的水质欠佳,世界多半河流的水量日益减少,而污染程度日渐加重。

人类对河道的治理在经历了工程治理、自然改造阶段后,逐渐发展到生态修复阶段。20世纪80年代以后,河流生态修复成为国际上的热点。欧洲、美国、日本等国家,河流生态修复的相关研

究与实践开展得较多,修复技术已相对比较成熟<sup>[1]</sup>。自20世纪90年代末,我国进入河流综合治理和生态修复阶段<sup>[2]</sup>,相继开展了河流的修复工作,但大多停留在模仿国内外已有案例的初步尝试和探索阶段。本文对河流治理单项技术进行介绍,以期开发出适合于特定河道污染治理与资源化及生态修复的集成技术,实现纳污河道水环境质量的整体改善,形成良好的河流生态系统。

### 1 物理技术

#### 1.1 人工曝气技术

人工曝气复氧技术是根据受污染河流缺氧的特点,人工向水体中充入空气或氧气,加速水体复

氧过程,以提高水体溶解氧水平,恢复和增强水体中好氧微生物活性,使水体中污染物得以净化,从而改善河流的水质。人工曝气通过物理吸附、生物吸收和生物降解等作用以及各类微生物和水生生物之间功能上的协同作用去除污染物,并形成食物链去除有机物。

人工曝气充氧技术在国外应用已经非常成熟,研究和应用结果表明:人工曝气可以有效改善河水水质。1989年美国在 Hamewood 运河口安装了曝气设备,结果表明,水体底层溶解氧显著增加,河道生物量也变得丰富起来。韩国的釜山港湾应用河道人工曝气技术,运行效果显著,彻底消除了水体黑臭现象,有效地削减了污染负荷,并有助于河道生态系统的恢复。1994年德国在 Berlin 河上使用了曝气复氧设备,充气能力为 5t/d,提高了河流水体净化功能,改善了水质。我国在 1990年 8~9月北京亚运会期间,有关部门在清河的一段中放置了 8台 11.025kW 的曝气设备,结果表明,河水溶解氧的含量从 0 上升至 6mg/L,水体 BOD<sub>5</sub> 去除率达到 60%,河流臭味基本得到消除<sup>[3]</sup>。上海市环科院于 1998年 1~12月在河道内的三个断面各设一个曝气点进行水体曝气复氧生物修复试验。结果表明,人工曝气显著提高了原先呈厌氧状态水体的溶解氧含量,从而刺激了好氧土著细菌的生长,在其作用下,水中有机污染物的去除率达 10.7%~23%左右<sup>[4]</sup>。东莞运河在下游莞城段,人工曝气后,河流末段还原物质浓度下降了 2.492mg/L、BOD<sub>5</sub> 浓度下降了 1.217mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度下降了 0.322mg/L<sup>[5]</sup>。

河道曝气方式除了采用固定式充氧站形式外,还采用移动式充氧平台形式。移动式充氧平台是河道曝气使用较多的方式,该技术自 20世纪 60年代起在一些国家得到应用<sup>[6]</sup>。

曝气除了可以采用空气曝气之外,还可以采用纯氧曝气。如王诚信等<sup>[7]</sup>采用 BIOX 工艺对上海苏州河进行曝气充氧的中试试验研究,结果表明:纯氧曝气可有效降低黑臭水体中 COD<sub>C</sub> 浓度,特别是水团流速较缓,处于平潮流态时, COD<sub>C</sub> 的去除率可达 19.5~56%。在经过纯氧曝气之后,水体的 BOD/COD<sub>C</sub> 值从 0.46 降至 0.40,水体黑色变浅。

另外,有研究表明<sup>[8,9]</sup>:采用人工复氧技术并投加生物制剂及底质改良剂,放养水生动植物等集成技术治理河道,效果比单纯复氧更好。

## 1.2 引水冲污

引水冲污是引清洁的江河水对河涌进行冲刷,提高河涌水的自净能力,缓解河涌水质污染状况。引水冲污过程主要通过河闸和抽水泵房等水利枢纽工程来实现,让上游清洁的外江水源往下游流动,形成“换水”。

引水冲污是一种切实可行的治理河涌污染的有效措施。引清洁的外江水稀释,可以迅速地消除河涌的黑臭,改善水质污染状况,同时也可以降低流到外江的污染带造成的局部污染。苏州市相城区位于引江济太工程的重点影响区域,通过引入长江水使相城区河网水质得到改善,在望虞河引水期间,水质基本可达Ⅲ类。

引水冲污改善河涌水质在我国福州、中山等城市也得到应用。引水冲污工程量大,必须制定切实可行的实施方案,根据污水水质情况计算出引水规模是关键技术,黄永福<sup>[10]</sup>在污水量预测的基础上,进行了福州内河引水规模的冲污效果分析,并应用于工程设计。引水冲污工程需要提高水利枢纽的质量,加固水闸,防止水闸内外压力差对水闸造成的破坏。同时,为提高河涌水的流速,增加冲污效果,要做好河涌疏浚清淤、拓宽整治和护岸的砌筑,使河底高程降低,使窄段断面增大,水流顺畅,河网调蓄能力增大,涝水能顺利流出。河涌引水冲污工程本身不能产生经济效益,启动抽水站的运行费昂贵(如福州内河引水冲污工程日运行费用需要 3~5万元);引水冲污工程量大,费用高。以福州市为例,福州市为了解决多年来内河的污染问题,累计投入 2 亿多元的资金,经过两年多引水冲污工程的建设,才缓解了困扰福州市多年的内河污染。而且引水稀释会导致引水水域和引入水水域生态体系发生变化。因此,利用引水冲污改善水质,恢复河涌生态的同时,必须考虑当地经济承受能力,使经济、生态环境、社会效益相结合,发展与环境相协调。

## 1.3 底泥疏浚

底泥的污染释放对水体影响极大,尤其是当河水水质较好时,底泥污染释放速率也会提高。当水动力条件增强时,底泥易获得启动流速而起伏,另外也易使底泥消耗大量 DO。

底泥疏浚分为工程疏浚和环保疏浚:工程疏浚主要为某种工程需要如疏通航道、增容等将河

道中的岩石、砂砾、砂、泥浆和粘土等物质从河道底部清除出去,疏挖底泥厚度一般为几米至几十米,施工精度为 20cm ~ 50cm,设备选用标准设备,对底泥进行泥水分离后,一般堆置;环保疏浚清除水体污染底泥外,还要求为水生生态系统的恢复创造条件,因而具有更高的要求,根据底泥的污染分布状况,疏挖底泥厚度一般小于 1 米,施工精度为 5cm ~ 10cm,设备选用标准设备或专用设备,对于底泥,根据泥、水的污染性质进行特殊处理,同时,疏浚过程中要尽可能避免底泥悬浮和细颗粒物质的扩散。

疏浚方式的不同所引起的细颗粒扩散程度或新生表层形态上的差异等可能产生不同的环境效应。一般粗放的抓斗式或耙吸式挖泥船的作业方式会引起大量的沉积物再悬浮及污染物的释放<sup>[11]</sup>;有一种原位底泥疏浚方式,可以提高效率和减少成本,如英国在港口航道用喷水清淤法(Water injection dredging)<sup>[12]</sup>,我国的玄武湖底泥疏浚也采用这种方法。这种方式造成疏浚后新生表层的污染底泥残留量较高,使污染物和营养盐向水体释放。目前最先进的环保式底泥疏浚方式是绞吸式挖泥船,这种方式是直接由管道在泥泵的作用下吸起表层沉积物并远距离输送到陆地上的堆场,这类疏浚船上安装自动控制和监视系统,大大提高了疏浚精度<sup>[13]</sup>。我国太湖五里湖、安徽巢湖、昆明滇池就采用这种疏浚方式。

底泥疏浚因能将污染底泥永久性去除,因而被较多用于湖泊和小型河流。在我国,这一措施甚至已成了与生态修复相提并论的治理手段。然而,底泥疏浚技术并不一定能从根本上使水环境得到改善。此外,疏浚河道的缺点:一是工程量大,耗资巨大;二是疏浚河道工程的环境后效存在很大的不确定性。

## 2 化学技术

### 2.1 化学除藻

化学除藻是目前国内外使用最多、也是最为成熟的杀藻技术。因其发展史较长,所以技术相对比较完善。主要采用絮凝、抑制、杀藻和综合等方法。

#### (1) 絮凝

絮凝沉降法具有操作和维修方便效果好等特点,可用于含大量悬浮物、藻类水的处理。对受污

染的水体可取得较好的净化效果,但基建费用和药剂成本较高,沉淀的污泥会伴生二次污染,通常协同其它工艺作为景观水的预处理措施。

聚合氯化铝(PAC)和酪蛋白絮凝泡沫分离法回收去除微细藻类。其最佳的药剂注入条件是,PAC添加浓度 5mg/L、急速搅拌时间 3min、酪蛋白添加浓度 15mg/L、pH7 ~ 8。此法无污染,适合于藻类的回收去除工艺<sup>[14]</sup>。

宁平等<sup>[15]</sup>试验研究结果表明:混凝剂种类、水样 pH 值对蓝藻去除率有很大影响。以精制硫酸铝为混凝剂, L<sub>3</sub>3<sup>4</sup> 正交法安排滇池蓝藻爆发期混凝沉降除藻实验。当调节 pH 值为 6、精制硫酸铝用量为 50mg/L 时,净化水浊度最低为 3.6,铝含量最低为 0.113mg/L,蓝藻去除率为 90%;pH 为 5.95 时,蓝藻去除率达到 96%<sup>[16]</sup>。

#### (2) 抑制

纳米级 TiO<sub>2</sub> 是很好的藻类抑制剂,其表现为可吸附并抑制单细胞原核蓝藻铜绿微囊藻大型变种的生长。从生理上分析纳米级 TiO<sub>2</sub> 具有促进藻内 O<sub>2</sub> 的产生、抑制包括 SOD、CAT 在内的抗氧化酶系与总抗氧化能力,最终表现在藻体可溶性蛋白含量下降、脂质氢过氧化物含量积累的增加,生命力降低<sup>[17]</sup>。

#### (3) 杀藻

杀藻常用的药剂有硫酸铜、漂白粉、明矾、聚铝和硫酸亚铁等。

采用硫酸铜及改变水的 pH 值可以达到去除水中藻类、降低甚至消除水腥味的效果,并且比单独投放硫酸铜要好。次氯酸钙能有效地杀灭引发水华的绿藻、蓝藻和硅藻,当有效氯含量  $\geq 62.5$  ppm,暴露 96h,4 种被实验藻类的死亡率可达 92% ~ 100%;有效氯含量为 500ppm 条件下,绿藻、蓝藻和硅藻分别在几 min 和 1h 内全部死亡;有效氯含量  $\leq 1$  ppm,对 4 种被试藻类基本上不造成严重伤害<sup>[18]</sup>。

由于硫酸铜对鱼类有毒性,不宜用于有鱼类的湖水,铁盐则会增加水的色度。2005 年 9 月南京玄武湖开展了以醋酸为主要成分的化学除藻剂治理蓝藻水华的实验研究,其除藻的主要原理为瞬时降低表层水体的 pH,破坏适宜蓝藻生存的环境。除藻剂平均用量为 26.87 g/m<sup>2</sup>,治理后实验区藻类总量下降了 82.8%;水体各项理化指标得到一定改善,但停止洒药后部分指标回升;浮游动物未出现显著变化。实验结果表明,除藻剂可能在

短时间内除抑蓝藻,但不能从根本上解决湖泊富营养化问题<sup>[19]</sup>。

此外,还有电化学法除藻。外加电流值及藻类的浓度值越高、电极间隔越狭小,阳极表面的藻类附着量就越大,在水中除藻的速度就越快<sup>[20]</sup>。

## 2.2 重金属固定

河流底泥中的重金属在一定条件下会以离子态或某种结合态进入水体,调高 pH 值可将重金属结合在底泥中,抑制重金属的释放。在较高 pH 值环境下,重金属形成硅酸盐、碳酸盐、氢氧化物等难溶性沉淀物。余光伟等<sup>[21]</sup>试验得出:投加石灰调节 pH 值至 8~9,上覆水体中重金属去除率达到 85%~98%,底泥重金属得到较好稳定。加入碱性物质可以抑制重金属以溶解态进入水体,但施用量不应太多,否则会对水生生态系统产生不良的影响<sup>[9]</sup>。

投加化学试剂,目的是为了提高水体的自净功能,但有时化学试剂的投加会产生长期的负面效应,而且化学方法是将污染物从水相转移到另一种物相,污染物的物态虽然改变,但并未从根本上消除污染物。

## 3 生物修复技术

### 3.1 微生物强化

微生物修复技术是在人为优化的条件下,利用自然环境中生息的微生物或人为投加的特效微生物的生命代谢活动,来分解水体中的污染物,修复受污染的环境。微生物对物质进行各种转化作用的生理学基础是其新陈代谢活动,即分解代谢和合成代谢。在新陈代谢过程中,微生物使各种物质经历了种种复杂的转化。微生物在生物修复中起着主导作用。早期的生物修复主要是利用微生物降解和转化环境中的有机污染物质。可以用于生物修复的微生物有很多,包括细菌、真菌及原生动物等。

在营养化污染水体中,原位修复投菌技术逐渐受到关注<sup>[22,23]</sup>。日本、韩国、澳大利亚等国采用定期向水中投放光合细菌,由于光合细菌能利用光能和氧将微污染水或废水中的无机和有机碳源及其它营养物质转化为菌体,从而能起到净化水质的作用。王琳等<sup>[24]</sup>利用复合微生物菌剂,在室内采用投菌法对富营养化人工景观湖水进行净化

试验,结果表明,采用不同投加量的菌剂对水体进行处理,水体中的 TN、TP、COD<sub>G</sub>、浊度显著降低;投加量为 0.01% 的处理效果最好,经过处理后,水体中 TN 浓度为 1.31 mg·L<sup>-1</sup>,TP 为 0.03 mg·L<sup>-1</sup>;COD<sub>G</sub> 为 19.38 mg·L<sup>-1</sup>。庞金钊等<sup>[25]</sup>应用优势菌剂处理城市湖泊水的小试结果表明,投加光合菌、硝化菌、复合菌的混合液对水中的浊度、叶绿素 a 有明显的去除效果,投菌后的第 8 天对浊度的去除率就达到了 88%,COD<sub>m</sub>、氨氮、叶绿素 a 等的含量均显著降低。向富营养化的城市湖泊水体投加微生物以净化水质的方法是可行的。

微生物强化技术净化水体具有工艺简单、无需构筑物、基建省等特点。该技术的关键问题是研制高效的微生物菌剂,国外在这方面的研究取得了一些成果,国内虽然开发出的微生物制剂不少,但真正效果好的不多。

### 3.2 植物强化

植物修复技术是以植物忍耐和超量积累某种或某些化学元素的理论为基础,直接利用有生命的绿色植物及与其共存微生物体系,清除或降低环境污染物的一项新兴技术。近年来的研究表明<sup>[26]</sup>,植物修复是一种比微生物修复更经济,更适于现场操作的去除环境污染物的技术,利用适当的植物不仅可去除环境中的有机污染物,还可去除环境中的重金属和放射性元素。

植物对污染物可通过根系吸收,也可以直接经茎、叶等器官的体表吸收,吸收到体内的有机物,如酚、氰等可以直接降解,重金属、有机氯农药,如 DDT、六六六等难降解物质,可贮存在植物体内,甚至达到很高的浓度时,植物仍不会受害。另外,水生植物通过遮光、对营养物的竞争和根系分泌的克藻物质达到抑制藻类生长、防止水华的作用<sup>[27]</sup>。常用于水体修复的植物有凤眼莲(即水葫芦)、芦苇、香蒲、喜旱莲子草、水芹、浮萍、菱、菖蒲等。

植物修复技术具有利用太阳能、安全、成本低、生态协调及环境美化功能等特点,常常也被称之为“绿色修复”。利用植物修复被污染的环境必须具备:①高效降解有机污染物、耐受或超富集重金属污染物的植物材料,②获得最佳修复效果的理论知识及实际操作关键技术。

采用水生植物净化水体也应注意一些问题:主要是某些水生植物繁殖速度太快,当打捞速度

跟不上生长速度时,易使大面积水面受水生植物覆盖,降低水体自净能力,并且未打捞的水生植物腐烂物还会对水体形成二次污染<sup>[28]</sup>。

### 3.3 生物膜法

生物膜法净化河流的实质是对天然河流中所发生的生物过程的一种强化,把天然过程改变成为天然与人工过程的结合体。它根据天然河床上附着的生物膜的净化作用和过滤作用,人工填充滤料或载体,供细菌生长,形成生物膜。当污染的河水经过生物膜时,污水和滤料或载体上附着生长的菌胶团接触。菌胶团表面由于细菌和胞外聚合物的作用,絮凝或吸附了水中的有机物,与污水中的有机物浓度形成一种动态的平衡,这使菌胶团表面既附有大量的活性细菌,又有适宜细菌繁殖的较高浓度的有机物。由于这种有利条件,菌胶团表层的细菌迅速繁殖,很快消耗水中有机物,这时污染河水中的有机物大部分被去除,水质也得到了改善<sup>[29]</sup>。研究表明<sup>[30-31]</sup>:生物膜法对河道水体中的 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 等都有较高的去除率。

### 4 展望

综上所述,物理、化学和生物修复技术各有短长,要针对河道具体特点、区域的具体情况,借鉴国内外河道治理的实践经验,开发适合河道污染治理与资源化及生态修复的集成技术。对于各类技术,有待进一步研究的领域主要有:①无泡曝气在人工曝气技术中的应用,以提高氧利用率,减少能耗;②底泥疏浚的精度计算及疏浚后对水体生态系统的影响研究;③微生物菌剂的研制,外界环境因子对菌剂投加后的影响研究;④生物膜法的创新改进,以提高脱氮除磷效果;⑤采用以生物修复技术为主,物理、化学技术为辅的集成技术,以及其对河流生态系统恢复的影响的研究等。生物修复技术将成为 21 世纪我国生态环境保护领域最有价值和最具生命力的生物处理技术。

### 参考文献:

- [1] 肖羽堂,赵美姿,高立杰.富氧生物膜法修复微污染源机理研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(6):796-800.
- [2] 杨文惠,严忠民,吴建华.河流健康评价的研究进展[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(6):607-611.
- [3] 张丙印,倪广恒.城市水环境工程[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 王诚信.污染河流的纯氧曝气复氧[J].上海环境科学,1999,18(9):411-413.
- [5] 王璟,夏文林.某市内河采用曝气辅助治理方案探讨[J].公用工程设计,2008,(10):57-60.
- [6] 许巍,孙水裕,袁斌.城镇污染河流修复技术研究进展[J].广东工业大学学报,2004,21(4):85-90.
- [7] 王诚信.污染河流的纯氧曝气复氧[J].上海环境科学,1999,18(9):411-413.
- [8] 黄民生,徐亚同,戚仁海.苏州河污染支流—倏宁河生物修复试验研究[J].上海环境科学,2003,22(6):384-388.
- [9] 盛彦清,陈繁志,秦向春,等.城市污染水体生物修复研究[J].地球化学,2005,34(6):643-649.
- [10] 黄永福.福州市内河引水引水规模及冲污效果分析[J].水利科技,1998,(4):5-7.
- [11] NICHOLS M, DIAZ R J, SCHAFFNER L C. Effects of hopper dredging and sediment dispersion, Chesapeake bay [J]. Environmental Geology, 1990, 15: 31-43.
- [12] SPENCER K L, DEWHURST K E, PENNA P. Potential impacts of water injection dredging on water quality and ecotoxicity in Limehouse Basin, River Thamea [J], SE England, U K, Chemosphere, 2006, 63(3):509-521.
- [13] 金相灿,荆一风,刘文生,等.湖泊污染底泥疏浚工程技术—滇池草海海底泥疏挖及处置[J].环境科学研究,1999,12(5):9-12.
- [14] 铃木祥广.用聚合氯化铝(PAC)和酪蛋白絮凝泡沫分离回收去除微细藻类[J].水环境学会志,2002,25(5):297-302.
- [15] 宁平.三氯化铁在滇池蓝藻爆发期除藻中的应用研究[J].农业环境保护,2001,20(5):348-350.
- [16] 宁平.混凝法在滇池蓝藻爆发期净水除藻的可行性研究[J].上海环境科学,2002,21(3):160-162.
- [17] 陆长梅.纳米级 TiO<sub>2</sub> 抑制微囊藻生长的实验研究[J].城市环境与城市生态,2002,15(4):13-15.
- [18] 况琪军.一种新型消毒剂的杀藻研究[J].重庆环境科学,2001,23(3):42-44.
- [19] 李静会,高伟,张衡,等.除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究[J].环境污染与防治,2007,29(1):60-62.
- [20] 谷村嘉惠.电化学法直接除藻[J].水环境学会志,2002,25(1):53-56.
- [21] 余光伟,雷恒毅,刘广立,等.重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术研究[J].环境科学学报,2007,29(7):1476-1484.
- [22] GROMMEN R, HAUTEGHEMI V, WAMBEKE MV, et al. An improved nitrify-ingenrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaria systems [J]. Aquaculture, 2002, 21(1):115-124.

### 3 模拟结果及分析

笔者选用  $L_9(3^4)$  型正交表<sup>[5]</sup>, 不考虑因素之间的交互作用。正交试验表见表 2。

利用 CFD 软件逐一模拟了 9 种试验方案的结果, 整个房间的温度平均值和 PMV 平均值随四个因素的变化分别如图 1、图 2 所示。本文省略了  $K_v$ ,  $\bar{K}_v$  和  $R_v$  的计算过程, 仅将计算结果列于表 2 中。确定最优方案的评价标准为: 夏季室内温度平均值越低越好,  $|\overline{PMV}|$  越小越好。

通过正交试验分析, 最优方案为:  $A_2B_3C_3D_1$ 。因为最优方案并没有包含在正交表中已做过的 9 个试验方案之中, 这正体现了正交设计的优越性<sup>[5]</sup>。笔者对其另做模拟, 模拟结果为:  $\bar{t} = 27.695^\circ\text{C}$ ,  $|\overline{PMV}| = 1.01862$ 。

### 4 结论

通过 Airpak 软件模拟结果及正交试验分析可知, 在这 4 个建筑因素中, 从温度平均值和 PMV 平均值的变化来看, 房间比例对建筑热环境的影响最大, 外窗的保温性能的影响次之, 窗墙面积比和

外墙的保温性能较前两者对建筑热环境的影响相对较小。

对于本文所选的三个水平, 最优方案为:  $A_2B_3C_3D_1$ , 即窗墙面积比为 0.1, 外窗的传热系数为  $2.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 外墙的传热系数为  $0.49 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ , 房间进深  $\times$  高  $\times$  开间为  $5\text{m} \times 3\text{m} \times 4\text{m}$ 。通过 Airpak 的模拟结果可知, 最优方案较其他方案具有较舒适的室内热环境。由此可见, 北京地区通过改善建筑设计因素, 能够有效提高室内热舒适水平。

### 参考文献:

- [1] 夏春海, 朱颖心, 林波荣. 方案设计阶段建筑性能模拟方法综述[J]. 暖通空调, 2007, 27(12): 32-40.
  - [2] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
  - [3] GB50019-2003, 采暖通风与空气调节设计规范[S].
  - [4] 袁凤东, 由世俊, 杨向劲. 地铁侧式站台空调气流 CFD 模拟[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(3): 303-307.
  - [5] 庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
  - [6] 王惠想, 张伟捷. 建筑空调能耗与城市热岛效应[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004, 21(1): 67-69.  
(责任编辑 闫纯有)
- 
- (上接第 60 页)
- [23] VEZZULLI L, PRUZZO C, FABIANO M. Response of the bacterial community to in situ bioremediation of organic-rich sediments[J]. Marine pollution bulletin, 2004, 49: 740-751.
  - [24] 王琳, 王迎春, 李季, 等. 微生物菌剂处理富营养化景观水体的室内试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 88-91.
  - [25] 庞金钊, 杨宗政, 孙永军, 等. 投加优势菌净化城市湖泊水[J]. 中国给水排水, 2003, 19(6): 51-52.
  - [26] 井艳文, 胡秀琳, 许志兰, 等. 利用生物浮床技术进行水体修复研究与示范[J]. 北京水利, 2003, (6): 20-22.
  - [27] 齐玉梅, 高伟生. 凤眼莲净化水质及其后处理工艺探讨[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 136-139.
  - [28] 姜应和, 宋涛. 受污染水体的水质恢复方法[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2): 69-72.
  - [29] 田伟君, 翟金波. 生物膜技术在污染河道治理中的应用[J]. 环境保护, 2003, (8): 19-21.
  - [30] FURUKAWA K, ICHIMATSU Y, HARADA C, et al. Nitrification of polluted urban river waters using zeolite-coated nonwovens[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2000, 35(8): 1267-1278.
  - [31] 唐玉斌, 刘宏伟, 郝永胜, 等. 外加碳源和生物激活剂对生物膜修复污染河水效果的影响[J]. 华东理工大学学报, 2003, 29(5): 489-492.  
(责任编辑 闫纯有)

作者: 苏冬艳, 崔俊华, 晁聪, 张建辉, 王培宁, SU Dong-yan, CUI Jun-hua, CHAO Cong, ZHANG Jian-hui, WANG Pei-ning  
作者单位: 河北工程大学, 城建学院, 河北, 邯郸, 056038  
刊名: 河北工程大学学报(自然科学版)   
英文刊名: JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING (NATURAL SCIENCE EDITION)  
年, 卷(期): 2008, 25 (4)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(31条)

1. 肖羽堂;赵美姿;高立杰 富氧生物膜法修复微污染水源的机理研究[期刊论文]-[长江流域资源与环境](#) 2005 (06)
2. 杨文惠;严忠民;吴建华 河流健康评价的研究进展[期刊论文]-[河海大学学报\(自然科学版\)](#) 2005 (06)
3. 张丙印;倪广恒 [城市水环境工程](#) 2005
4. 王诚信 [污染河流的纯氧曝气复氧](#) 1999 (09)
5. W.NC065;夏文林 某市内河采用曝气辅助治理方案探讨[期刊论文]-[公用工程设计](#) 2008 (10)
6. 许巍;孙水裕;袁斌 [城镇污染河流修复技术研究进展](#)[期刊论文]-[广东业大学学报](#) 2004 (04)
7. 王诚信 [污染河流的纯氧曝气复氧](#) 1999 (09)
8. 黄民生;徐亚同;戚仁海 [苏州河污染支流-绥宁河生物修复试验研究](#)[期刊论文]-[上海环境科学](#) 2003 (06)
9. 盛彦清;陈繁忠;秦向春 [城市污染水体生物修复研究](#)[期刊论文]-[地球化学](#) 2005 (06)
10. 黄永福 [福州市内河引水引水规模及冲污效果分析](#) 1998 (04)
11. NICHOLS M; DIAZ R J; SCHAFFNER L C [Effects of hopper dredging and sediment dispersion, Chesapeake bay](#) 1990
12. SPENCER K L; DEWHURST K E; PENNA P [Potential impacts of water injection dredging on water quality and ecotoxicity in Limehouse Basin, River Thamea](#) 2006 (03)
13. 金相灿;荆一风;刘文生 [湖泊污染底泥疏浚工程技术-滇池草海底泥疏挖及处置](#)[期刊论文]-[环境科学研究](#) 1999 (05)
14. 铃木祥广 [用聚氯化铝\(PAC\)和酪蛋白絮凝泡沫分离回收去除微细藻类](#) 2002 (05)
15. 宁平 [三氯化铁在滇池蓝藻爆发期除藻中的应用研究](#)[期刊论文]-[农业环境保护](#) 2001 (05)
16. 宁平 [混凝法在滇池蓝藻爆发期净水除藻的可行性研究](#)[期刊论文]-[上海环境科学](#) 2002 (03)
17. 陆长梅 [纳米级TiO<sub>2</sub>抑制微囊藻生长的实验研究](#)[期刊论文]-[城市环境与城市生态](#) 2002 (04)
18. 况琪军 [一种新型消毒剂的杀藻研究](#)[期刊论文]-[重庆环境科学](#) 2001 (03)
19. 李静会;高伟;张衡 [除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究](#)[期刊论文]-[环境污染与防治](#) 2007 (01)
20. 谷村嘉惠 [电化学法直接除藻](#) 2002 (01)
21. 余光伟;雷恒毅;刘广立 [重污染感潮河道底泥释放特征及其控制技术研究](#)[期刊论文]-[环境科学学报](#) 2007 (07)
22. GROMMEN R; HAUTEGHEMI V; WAMBEKE MV [An improved nitrify-ingenrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaria systems](#)[外文期刊] 2002 (01)
23. VEZZULLI L; PRUZZO C; FABIANO M [Response of the bacterial community to in situ bioremediation of organic-rich sediments](#)[外文期刊] 2004 (9/10)
24. 王琳;王迎春;李季 [微生物菌剂处理富营养化景观水体的室内试验研究](#)[期刊论文]-[农业环境科学学报](#) 2007 (01)
25. 庞金钊;杨宗政;孙永军 [投加优势菌净化城市湖泊水](#)[期刊论文]-[中国给水排水](#) 2003 (06)

26. [井艳文;胡秀琳;许志兰](#) [利用生物浮床技术进行水体修复研究与示范](#)[期刊论文]-[北京水利](#) 2003(06)
27. [齐玉梅;高伟生](#) [凤眼莲净化水质及其后处理工艺探讨](#) 1999(02)
28. [姜应和;宋涛](#) [受污染水体的水质恢复方法](#)[期刊论文]-[环境污染治理技术与设备](#) 2003(02)
29. [田伟君;翟金波](#) [生物膜技术在污染河道治理中的应用](#)[期刊论文]-[环境保护](#) 2003(08)
30. [FURUKAWA K;ICHIMATSU Y;HARADA C](#) [Nitrification of polluted urban river waters using zeolite-coated nonwovens](#) 2000(08)
31. [唐玉斌;刘宏伟;郝永胜](#) [外加碳源和生物激活剂对生物膜修复污染河水效果的影响](#)[期刊论文]-[华东理工大学学报](#) 2003(05)

#### 本文读者也读过(6条)

1. [时国栋.李霞](#) [污染河流的生物修复](#)[期刊论文]-[中国高新技术企业](#)2008(9)
2. [徐海娟.冯本秀.Xu Haijuan.Feng Benxiu](#) [河流污染治理与生态恢复技术研究进展](#)[期刊论文]-[广东化工](#) 2008, 35(7)
3. [朱灵峰.张玉萍.邓建绵.吴波.明海涛.王哲](#) [河流修复技术应用现状及生态学意义](#)[期刊论文]-[安徽农业科学](#) 2009, 37(7)
4. [吴林林.黄民生.邓泓.Wu Linlin.Huang Minsheng.Deng Hong](#) [城市污染河流生物-生态治理研究与应用进展](#)[期刊论文]-[净水技术](#)2006, 25(6)
5. [张媛](#) [污染河流的生物—生态修复技术及其研究](#)[学位论文]2006
6. [杨辉.范宝山.李小平](#) [河流的生物修复](#)[会议论文]-2009

#### 引证文献(1条)

1. [张乾铄](#) [生物-生态措施修复治理河流污染综述](#)[期刊论文]-[现代农业科技](#) 2009(6)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_hbjzkjxyxb200804016.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200804016.aspx)