

射流理论在水环境保护中的应用

张丽娜, 王 烜

(北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要 :从污水海洋处置工程、射流冲沙清淤、射流曝气改善水质、空化射流治理湖泊富营养化以及气泡羽流阻止盐水入侵等方面对射流理论在水环境保护中的应用进行了综述和分析, 并指出应从理论、试验与实际应用等各方面继续加强对射流的研究。

关键词 射流; 污水海洋处置; 清淤; 水质; 富营养化; 盐水入侵

中图分类号 :TP69 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2006)06-0071-05

Application of jet theory in water environment protection

ZHANG Li-na, WANG Xuan

(*Environmental School, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract :The applications of the jet theory in the environmental protection, including the ocean disposal project for sewage, the jet dredging, the jet aeration for improving water quality, the cavitation for controlling eutrophication, and the bubble plumes preventing salt water intrusion, were comprehensively summarized and analyzed. It is also pointed out that further studies should be carried out on related theories, experiments, and applications.

Key words jet flow; sewage ocean disposal; dredging; water quality; eutrophication; salt water intrusion

随着人口的迅猛增长和现代化工农业的快速发展,大量的工农业废水和生活污水被排入江河和近海水域,造成水体的严重污染。这些废弃污水在受纳水域中的扩散和稀释,均由排放口近区的流动特性所控制。为了增强污染物在排放近区的稀释能力,控制环境的污染,需要研究水体环境中的射流特性^[1]。射流是指从各种排泄口(如孔口、管嘴或缝隙)中喷出流入另一流体域内的一股运动流体,环境工程中,对排污、排热、排气的近区扩展分析计算和模拟,均需要应用射流理论。尤其是近一二十年来,射流理论已经成为现代流体力学及环境科学的一个重要研究课题,开展其在水环境保护和环境工程设计等方面的应用研究具有重要的实际意义。

1 射流的基本理论

按照不同的划分标准,可以将射流分为各种类型,按照射流的原动力,分为动量射流(简称射流)、

浮力羽流(简称羽流)和浮力射流(简称浮射流)。在紊动射流的运动中,惯性力与浮力的比例关系起决定作用,这两种力的相对作用可以用密度佛汝德数(densimetric Froude number)来衡量。若射流的出流速度较高,依靠出射的初始动量来维持自身的继续运动,动量对流动起支配作用,称为动量射流;若射流的初始出射动量很小,流动的发生和扩展主要靠浮力的作用,称为浮力羽流,若兼受动量和浮力两种作用而运动,则称为浮力射流。消防用水枪、农业喷灌中的喷流等属动量射流;密度小的废水泄入含盐度大的海水、热源上的烟气等属浮力羽流;核电站和核电站的冷却水排入河流或湖泊中的热水射流、污水排入密度大的河口或港湾的污水射流等属浮力射流。

射流问题的研究目的,主要在于确定射流流速的分布,射流轴线的轨迹以及射流扩展的范围。对于变密度、非等温以及挟带有污染物质的射流则还

基金项目:教育部科学技术重点资助项目(105009)、国家自然科学基金资助项目(50509001)

作者简介:张丽娜(1982—),女,河南焦作人,硕士研究生,研究方向为水资源与水环境。E-mail:zhys313@163.com

需要确定密度分布、温度分布和挟带物质的浓度分布。射流问题的分析方法目前主要有3种:①实验方法;②从流体力学的角度出发求射流边界层偏微分方程的解析解或数值解,以实现射流的计算和预测;③用动量积分法引入速度分布的假设,将偏微分方程转化为常微分方程求解,使问题进一步简化。其中,通过实验方法研究射流的测试技术装置主要有皮托管、热膜测流仪、激光多普勒测速仪以及流动显示技术等。此外,分析射流运动还可以采用渐进分析法确定无量纲参数之间的数学关系等,解决具体问题通常需要综合运用多种方法^[2]。

近年来,关于射流运动规律的研究成果层出不穷,可以从很多角度对其进行分类。就射流发展的环境水体特征而言,目前对静止环境中的射流研究较多,例如槐文信等^[3]就静止浅水环境中铅直圆形射流的隆起高度及其分布、中线流速沿程衰减规律和流场的流函数等值线给出了实验研究成果,并研究了垂直排放的淹没平面紊动射流;曾玉红等^[4]针对不同的射流参数和环境流体参数下的有限深平面垂直射流,采用混合有限分析法对近区以稳定浮力表面层形式排放和由于近区漩涡产生二次吸附的非稳定排放两种流动形态的混合流体的流速场和温度场进行了数值模拟。对于动水环境中射流的研究,大多集中在单圆孔射流的研究上,槐文信等^[5]对流动均匀环境中负浮力射流进行了研究,给出了圆形倾斜排放负浮力射流的最大上升高度的新公式,且对圆形射流和平面射流不同倾角下的射流规律进行初步探讨;杨中华等^[6]对流动环境中铅垂圆形负浮力排放进行了三维数值模拟,给出了不同射流比下的流线图和断面密度等值线图。随着测试技术的不断改进和计算机水平的不断提高,对射流理论及其应用的研究不断发展并逐步走向成熟。

2 在水环境保护中的应用

2.1 污水排海工程的设计

“污水排海工程技术”是在不影响水体功能的前提下,借助远离岸边并置于海床上的多孔扩散器,将经过一定处理的城市废水或类城市废水均匀地排入海域,合理利用海洋的稀释、扩散、输移和自净能力降低污染物的浓度。与污水二级处理相比,其工程具有基建投资小、占地面积少、日常运营费用低廉等优点^[7]。为了保护环境,目前许多国家的沿海城市已经或正在兴建各种类型的污水海洋处置工程。国外近百年的工程实践证明,污水海洋处置工程是一条解决沿海地区特别是沿海城市水污染问题的有效途径。我国江河众多,充分利用自然水体的环境容

量和自净能力来控制城市污水的排放不失为一种经济可行的措施。

我国虽然在城市污水海洋处置工程的规划、设计等方面起步较晚,但在技术储备和技术提高方面“取人之长,补己之短”,大多研究都是结合污水排海实际工程进行的。“六五”期间开始研究污水排海,“七五”期间,沿海一些开放城市和特区,如上海、深圳、烟台等先后进行污水排海、排江工程的研究和设计,取得了丰硕的成果,目前沿海19个开放城市和特区大都有修建污水海洋处置工程的规划,其中有些正在施工,有些已经运行^[8]。1991~1995年,中国环境科学研究院与各地近30个单位合作进行污水海洋处置的攻关研究工作,涉及四大海区、10个水域、11个沿海省市、38个地方4个典型工程^[9]。

上海合流污水二期工程是我国最大的污水治理工程,建设此项工程的主要目的是减缓黄浦江上游水质污染。工程服务范围包括浦西徐汇、卢湾两个区和闵行、吴泾工业区、浦东赵家沟以南陆家嘴、洋泾、金桥、张江、北蔡、云莲、杨思、六里等地区,总服务面积269.6 km²,服务人口275.7万,污水量500 × 10⁴ m³/d左右,近期设计旱季污水量170 × 10⁴ m³/d。在浦西浦东新建截流总管,将污水输送至白龙港,污水经预处理后在白龙港排放长江口^[10]。

实施污水排海工程的关键是科学地设计污水排放口,因此,必须了解污水排入环境水体后的运动规律,特别是污水在近区的稀释扩散情况,这些主要取决于扩散器特征和浮射流的初始参数,故扩散器水力参数的选取与设计、各种水体环境条件下浮射流运动规律是环境设计部门和环境水力学工作者十分关心的问题^[11]。近年来,学者在这方面做了很多研究,何强等^[12]提出用近区模型对污水海洋排放扩散器结构进行概念设计的方法,分析近区水质的各种要求以确定合适的扩散器结构,同时结合扩散器水力学和工程上的要求优化扩散器的结构;韩会玲等^[13]利用混合有限分析法及交错网格的思想,对横流中有限长线源型浮力射流进行数值计算,成功模拟了端涡现象及其发展过程,并分析了扩散器长度对湍浮力射流的影响;徐高田等^[14]结合上海市污水治理二期工程稀释扩散规律物理模型试验,通过建立并求解积分控制方程的方法,对动水环境下单喷口浮射流的近区稀释扩散特性进行了研究,拟合出长江口白龙港水域的掺混系数、绕流阻力系数以及施密特数,并建立了计算污水单喷口出流近区稀释扩散特性的数学模型,可为实际工程扩散器的设计提供依据;赵毅山等^[15]通过控制扩散器三通及喷头局部阻力系数,使各上升管出流量不均匀分配,根据

伯努利能量方程组建立数学模型,用数学模型来计算扩散器上升管出流量和水头损失,并通过扩散器水力模型试验进行验证,黄菊文等^[16]对上海市污水治理二期工程白龙港排放口,在放流管、扩散器长度以及环境水体条件都已确定的条件下,通过局部和整体模型试验,进行了三通、喷头局部参数等对喷头阻力系数的影响、等截面扩散器上升管流量不均匀分配试验研究。

我国的污水海洋处置情况与国外差别很大,最主要的一点就是国外污水海洋处置工程排放口水域较深,而国内污水海洋处置工程水深一般相对较浅。例如上海市污水治理二期工程排放口位于白龙港水域,该地区水深浅、密度差小,有些时候接近于零,在平均水深7m左右的情况下,排放170万 m^3/d 的污水,而扩散器长度受到主航道的限制不能再增加。为了合理地确定扩散器工程参数,提高污水近区稀释扩散效果,合理利用长江口大水体稀释扩散、输移能力,徐高田等^[17]通过多方案、多工况的数值模拟以及水工物理模型试验研究,通过对大量数据的综合研究,选择出了适宜的喷口射流角度、喷口个数以及喷口布置方案,分析了各种因素对污水稀释扩散效果的影响,研究其稀释扩散规律,最后采用上升管设多个喷口的布置形式,并根据具体情况进行修正,其研究结果为上海合流污水二期工程扩散器的设计提供了依据,对于国内同类较浅水域污水海洋处置工程扩散器的设计,也有着重要的指导意义。

2.2 射流冲沙、清淤

泥沙局部淤积经常带来工程运行上的困难。例如,我国火、核电厂所需冷却水大多取自江河、海湾、湖泊等水域,在淤积性水域,当取水系统工作间歇时取水口局部会产生泥沙淤积,间歇时间越长泥沙淤积越多,甚至可能影响到系统的正常运行。输水系统中,输水管道系统的特殊部位如水泵前池,过流断面尺寸较大,由此导致断面流速骤减,水流挟沙力减小,泥沙在前池内淤积,淤积严重时水泵难以重新启动,水库坝前区等工程部位也常会出现泥沙淤积,影响水库正常运行^[18];另外,在前面述及的污水排海工程中,海洋中的泥沙在波浪、潮汐和水流的作用下,可能会在扩散器排放口附近产生泥沙淤积,当扩散器喷口处的水压力不能冲开泥沙淤积时,则会造成排放口排水不畅,如果在扩散器处存在不断的泥沙淤积过程,而排放口处于建设期、运行中因故停止运行或小流量运行时期,不断淤厚的泥沙可能也会淤埋扩散器喷口^[19]。因此,研究取水、输水等工程局部泥沙淤积的预防具有工程应用价值。

射流冲沙和清淤是解决局部泥沙淤积的一种方

法,在许多工程领域有着广泛的研究和应用。水利工程中的闸下出流,造纸、矿山和生活污水的处理和排放,特别是近年来在利用射流疏浚和维护被淤塞的港湾、航道和水闸等方面取得了良好的经济效益。例如,美国海军土木工程实验室为解决军港淤积问题,曾进行了一系列室内和野外试验研究;近年来,为抑制潼关河床高程的不断抬升,在潼关河段利用安装在船舶上的射流喷嘴系列进行了河道清淤及相应的野外测验和室内试验^[20];齐梅兰等^[18]通过实验和分析,对射流冲沙机理进行了具体研究,实验根据泥沙输运需要消耗水流紊动能的观点,以加入水射流的方式强迫水流紊动,从而增加水流局部紊动输沙能力,陈稚聪等^[21]考虑了以增强水流局部紊动来增加局部水流挟沙能力的原理,采用水射流措施,有效地消除了有压输水系统的泥沙淤积现象,并通过研究泥沙局部淤积规律,用规定取水系统合理运行时间的方式,达到了预防局部泥沙淤积的工程效果。国外一些学者也进行过此类问题的研究,如Aderibigbe等^[22]在实验室研究了淹没射流作用下,局部床面形态的变化规律。射流局部紊动输沙机理的研究对预防工程中泥沙局部淤积有重要的意义,但其基础研究是在实验室条件下进行的,如何应用于实际工程,尚需进一步研究。

2.3 射流曝气改善水质

由于城市河流污染类型大多属于有机污染型,而水体的黑臭又是无氧时厌氧菌作用的结果,因此对河流水体采用人工曝气的方式进行充氧,加速水体复氧过程,提高水体中好氧微生物的活力,是改善水质的有效办法^[23]。

射流曝气是20世纪80年代末从原民主德国配套引进的废水处理技术,它采用了负压引射的射流曝气方式,一般应用于环保工程中处理地面污水。射流器采用文丘里喷嘴,工作水泵出水通过射流器的喷口,随着喷嘴直径变小,液体以极高的速度喷射进水气混合室,高速流动的液体通过水气混合室时形成真空,通过导气管吸入大量空气,空气被吸入混合室后,在喷水压力的作用下被分割成大量微小的气泡,与水形成混合物。气液混合物通过扩压管向外排出,其速度减慢,压力增强,形成强力喷射流,对污水搅拌充氧。气泡经多次切割,喷射扰动后,变成无数的细小气泡,其表面积很大,使空气中氧更易快速溶解于水中。由于气泡直径小,上升速度缓慢,从而增长了大气中氧气溶解于水的时间,促使污水和氧气充分混合接触,氧化污水中的还原性物质,杀灭大部分硫酸盐还原菌和其他一些厌氧菌,进而达到处理污水的目的^[24]。

射流曝气技术具有如下优点^[25]:氧总传质系数大、氧利用率高、氧动力转移效率高;混合搅拌作用强,提高了污泥的沉淀性能,所需曝气时间短;设备构造简单、加工方便、工作可靠、运转灵活、便于调节;一般喷嘴直径大于等于 20 mm,不易堵塞、易维修管理;融氧速度快、电耗少、运转费用低、占地面积小;当采用自吸式射流曝气器时,可取消鼓风机,消除噪音污染。但是在实际应用中发现,当前射流曝气技术发展中存在动力效率较低、充氧能力较弱、设备易腐蚀老化、性能不稳定、故障率高、使用寿命不长等缺点。

射流曝气技术的应用与完善,有赖于射流曝气器的研制与发展,曝气设备作为污水生物处理工艺中的核心设备已日益受到世界各国水处理界和企业界的高度重视,随着污水生物处理工艺对曝气设备的要求越来越高以及能源的日趋紧张,新型高效低能耗的曝气设备的研究已经成为推动污水处理事业和环保产业发展以及节能降耗的重要部分^[25]。另外,不同的原水水质条件和应用条件,会对射流曝气器的效能曲线产生一定的影响,根据不同的原水水质条件和应用条件,开发不同型号的射流曝气器,使射流曝气技术得到推广应用也是进一步研究的重点。

2.4 空化射流治理湖泊富营养化

由物理学可知,如果忽略形成小气泡时表面张力的微小作用,则当水流局部的绝对压力降低到当地温度下的饱和蒸汽压力时,液体内部原来含有的很小气泡将迅速膨胀,在液体内部形成含有水蒸气或其他气体的气泡,这种现象就称为空化现象^[26]。近年来的研究表明:空泡溃灭时极短时间内在空泡周围的空间出现热点产生约 5000 K 的高温 and 50 MPa 以上的高压,温度变化率高达 10^9 K/s,并伴随强烈的冲击波和速度达 100 m/s 的微射流,这些条件足以使有机物在空化气泡内发生化学键断裂、水相燃烧、高温分解或自由基反应^[27]。

空化水射流可以用来治理富营养化水体,因为在空化产生的高温、高压条件下,不仅可以直接杀菌、杀灭浮游生物,而且也足以打开结合力强的化学键并且促进“水相燃烧”反应;空泡溃灭时水发生裂解,在水溶液中产生了局部高浓度的氧化剂如 $\text{OH}\cdot$ 和 H_2O_2 ,它们能直接氧化水中化学污染物;空泡溃灭时产生的高温高压超过了水的临界点($T_c = 647$ K, $P_c = 22.1$ MPa),致使水体中空化区域存在着局部的超临界水,超临界水对有机物和氧具有很高的溶解性,因此,在化学反应状态下能存在含有均相混合物的单相态,这就消除了通常高温高压下化学反应的相间转移,从而大大加速了氧化速度。

喷嘴结构形状、水泵压力、射流的切换频率、处理池的结构形状和尺寸、原水的温度、BOD、浮游生物及细菌的数量和种类、总氮量和 pH 值等都对空化射流的处理效果有一定的影响^[27]。如何根据射流理论,切实提高空化射流治理湖泊富营养化的效果还有待进一步研究。

2.5 气泡羽流阻止盐水入侵

在沿海地区,盐水入侵已经成为一种灾害现象,它是由于各种自然因素(如气候干旱或海平面上升)和人为作用(主要是过量开采地下水)使海水或咸水沿地下空隙介质向内陆淡水体渗流、弥散的一种水动力过程。盐水入侵将导致水质恶化、土壤盐渍化及荒漠化等一系列生态环境问题,制约当地的发展。人类虽然不可能从根本上清除这类灾害,但可以采取一定的措施控制灾害,防止由于人类活动导致盐水入侵的进一步加剧^[28]。针对盐水入侵问题,以往采用的防治措施和方法,大多存在投资大、运行间断等不足。为此,作为一种经济可行的方法,近年来利用气泡射流形成气泡幕阻止盐水入侵,已日益受到人们的关注。

当连续地把一种气体释放到液体中去时,气体因受到自身压力与周围环境压力的不平衡以及气液交界面张力等的作用,破裂成气泡,产生浮力,使得气泡上升,上升的气泡诱导周围的液体向上运动,形成气泡羽流运动^[29]。气泡羽流在实际工程中具有广泛的应用。以阻止盐水入侵之类的异重流为例,在河口埋设一排连接空压机的有孔管,有孔管孔口朝上,当从河底向上喷射的高压气体造成其独特的环流场时,可以使异重流头部受到抵挡和破坏,从而起到阻止异重流进入的作用;同理,在油码头,启动压缩机将充气送给水下气泡管,用气泡羽流产生的表面流动控制油污的扩散、保证港区装卸时造成的溢油封闭在港内;另外,还可以用气泡羽流作防波堤来防护土木工程,控制水库和湖泊中的分层结构以改善水质,防止水路和港口结冰,为水生物增氧等等。

防治盐水入侵等工程的实施需要对气泡羽流的流动特性进行深入研究。除实验工作外,以往在这方面的理论分析主要集中在半经验和积分模型方面^[30-31],积分方法比较简单,易于得到时均物理量的沿程变化规律,但是需要预先假定时均流速等的横断面分布,并且每一种积分理论都是半经验性的,这些都在很大程度上限制了积分模型的适用范围^[32]。因此,近年来国内外学者在气泡羽流的研究中不断引入新的理论和方法,使问题的研究有了一定的进步。王双峰等^[31-32]从双流体概念出发,结合气-液两相流的特点,建立了描述两相湍流流动方程

(液相湍动能 k 方程和湍动能耗散率 ϵ 方程)模型,并结合混合有限分析法将模型用于对静止均匀环境中两种类型的气泡羽流进行数值模拟和分析;槐文信等^[29]针对积分分析方法中气泡羽流是否存在自相似性和气泡在水体中的滑移速度量级这两个重要问题给出了分析,得出了一些有益的结论;马霞等^[33]提出了预报圆形气泡羽流特性的 k - ϵ - E 湍流模型,对静止环境中的圆形气泡羽流流场进行数值模拟,得出了气泡羽流的流速场和浓度场。随着水体环境的季节变化以及应用区域的不同,研究背景将会变得更为复杂,所以,气泡羽流在理论和实际应用方面都需要作更深入的研究。

3 结 语

射流理论是分析排放口近区污染物扩散和稀释规律的基础理论,目前已被广泛地研究和应用于污水排海工程的设计、冲沙清淤、曝气改善水质、湖泊富营养化治理以及气泡羽流阻止盐水入侵等诸多方面,在水环境保护中发挥了重要的作用。全球水环境的日益恶化对射流理论的研究和发展提出了愈来愈高的要求。随着现代科技的迅猛发展以及计算机处理能力的不断提高,射流理论作为现代流体力学和环境科学的一个重要课题,在其理论研究、新技术开发以及相关设备研制上还有很大的发展空间。

a. 在理论研究方面,各种水环境条件下射流基本理论的研究均有待加强。此外,采用新的数学方法和技术手段,使理论、试验向更深入、更微观的领域发展将是进一步研究的重点。例如,在模型的建立和计算、设备参数的设计中采用人工神经网络、遗传算法等,在试验中运用激光测速仪、热线、瞬态流场测试技术、数字图像处理技术等,以实现水环境的动态模拟和精细模拟,为更好地解决实际工程问题提供理论基础。

b. 在技术设备方面,应加快对国外先进技术设备的消化吸收,提高我国射流清淤、曝气设备的科技含量,如何优化喷嘴结构、水泵压力、处理池的形状和尺寸等,来改善空化射流治理富营养化的效果、改善水质等也是亟待解决的问题。

c. 在实际应用方面,应根据各地区不同的水环境条件和应用条件,以切实改善水环境质量为目的,扩大污水排海等环保工程的实施范围,使理论的应用和工程的设计得到进一步推广;另外,在射流局部紊动输沙、空化射流治理富营养化、气泡射流阻止盐水入侵等方面也应加强研究,以达到更为满意的应用效果。

可以预见,随着研究的逐步深入,射流理论将在

水环境保护各方面得到更为广泛的应用并取得经济效益。

参考文献:

- [1] 李家春. 现代流体力学发展的回顾与展望[J]. 力学进展, 1995, 25(4): 442-450.
- [2] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 187-201.
- [3] 槐文信, 邢宇彤, 董汉毅, 等. 静止浅水环境中铅垂紊动射流的试验研究[J]. 水利学报, 2002(9): 32-36.
- [4] 曾玉红, 槐文信. 静止环境中垂直平面浮力射流稳定性与混合特性数值研究[J]. 水利学报, 2004(9): 56-62.
- [5] 槐文信, 杨中华. 动水中负浮力射流特征量的研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2001, 16(4): 497-502.
- [6] 杨中华, 槐文信. 流动环境中铅垂圆形负浮力排放的三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 286-290.
- [7] 康建华. 污水排海大有可为[J]. 水处理技术, 1997, 23(5): 309-310.
- [8] 徐高田, 韦鹤平. 上海市污水治理二期工程扩散器的改进设计[J]. 环境工程, 2000, 18(4): 13-15.
- [9] 张永良, 赵章元, 周岳溪, 等. 污水海洋处置综合研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(1): 7-13.
- [10] 徐高田, 韦鹤平. 恒定横流底部多孔排放近区污水稀释扩散效果因素研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 127-131.
- [11] 钟迪锋, 韦鹤平, 刘朴. 污水海洋处置工程近区稀释扩散试验研究[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(4): 1-6.
- [12] 何强, 陈刚, 钟坚. 近区模型用于污水海洋排放扩散器结构概念设计的研究[J]. 给水排水, 2000, 26(1): 25-29.
- [13] 韩会玲, 李炜. 横流中扩散器长度对浮力射流的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2000, 15(4): 511-517.
- [14] 徐高田, 韦鹤平. 动水环境单喷口浮射流稀释扩散效果数学模型研究[J]. 水利学报, 2001(1): 18-22.
- [15] 赵毅山, 韦鹤平. 污水扩散器非均匀排放水力设计计算[J]. 同济大学学报, 2002, 30(12): 1492-1497.
- [16] 黄菊文, 李光, 韦鹤平, 等. 截面扩散器上升管流量不均匀分配研究[J]. 环境工程, 2005, 23(4): 92-95.
- [17] 徐高田, 韦鹤平. 上海市污水治理二期工程白龙港排放口潜没多孔排放污水近区稀释扩散效果研究[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 41-45.
- [18] 齐梅兰, 陈稚聪, 府仁寿. 射流冲沙研究[J]. 水利学报, 2003(12): 71-75.
- [19] 刘成, 何耘, 韦鹤平. 圆形射流冲刷疏松淤沙的研究[J]. 泥沙研究, 2001(3): 40-45.
- [20] 李文学, 张隆荣, 张原锋, 等. 射流冲刷试验研究[J]. 泥沙研究, 1999(4): 5-11.
- [21] 陈稚聪, 府仁寿, 齐梅兰. 有压输水系统中用射流冲沙的系列模型试验研究[J]. 水利学报, 2003(5): 55-58.
- [22] ADERIBIGBE O O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impingement in vertical turbulent jets[J]. Journal of Hydraulic Research, 1996, 134(1): 19-34.

(下转第 80 页)

Chemosphere, 1999, 36(3): 565-571.

[19] PONDER S M ,DARAB J G ,MALLOUK T E. Remediation of Cr(VI) and Pb(II) aqueous solutions using supported ,nanoseale zero-valent iron[J]. Environ Sci Tech ,2000 ,34 (12) 2564 -2569.

[20] US EPA. Long term performance of permeable reactive barriers using zero-valent iron : an evaluation at two sites [R]. EPA/600/S-02/001 ,2002.

[21] 刘菲 ,钟佐. 地下水中氯代烃的格栅水处理技术[J]. 地学前缘 ,2001 ,8(2) 309-314.

[22] BAKER M J ,BLOWES D W ,PTACEK C J. Laboratory development of permeable reactive mixtures for the removal of phosphorous from onsite wastewater disposal system[J]. Environ Sci Tech ,1998 ,32 2308-2316.

[23] GUERIN T F , H ORUER S , M CGOVEM T , et al. An application of permeable reactive barrier technology to petroleum hydrocarbon contaminated groundwater[J]. Water Research ,2002 , 36 :15-24.

[24] DAVID W B ,CAROL J P ,SHAWN G B ,et al. Treatment of

inorganic contaminants using permeable reactive barriers[J]. J of Contaminant Hydrology ,2000 ,45 :123-137.

[25] RALPH D L ,RICK G M ,DAVID W B , et al. A permeable reactive barriers for treatment of heavy metals[J]. Ground Water ,2002 ,40(1) 59-66.

[26] SCHIPPERL , Vojvodic-Vukovic M. Nitrate removal from groundwater using adenitrification wall amended with sawdust : field trial[J]. J Environ Qual ,1998 ,27 664-668.

[27] BENNER S G ,HERBERTR B J ,BLOWES D W ,et al. Geo chemistry and microbiology of a permeable reactive barrier for acid mine drainage[J]. Environ Sci Tech ,1999 ,33 :2793 -2799.

[28] CANTRELL K J ,KAPLAN D I. Retention of zero ,valent iron colloids by sand columns : application to chemical barrier formation[J]. J Environ Eng ,1997 ,123(5) 499-505.

[29] CANTRELL K J ,KAPLAN D I ,GILMORE T J. Injection of colloidal Fe⁰ particles in sand with shear thinning fluid[J]. J Environ Eng ,1997 ,123(8) 786-791.

(收稿日期 2005-06-03 编辑 舒 建)

(上接第 75 页)

[23] 朱广一 ,冯煜荣 ,詹根祥 ,等. 人工曝气复氧整治污染河流[J]. 城市环境与城市生态 ,2004 ,17(3) 30-32.

[24] 丁延国 ,张建 ,张旭. 污水射流曝气工艺技术在聚驱中的应用[J]. 大庆石油地质与开发 ,2003 ,20(1) 50-51.

[25] 王亮 ,乔寿锁. 射流曝气技术及装置在污水处理领域的发展现状[J]. 中国环保产业 ,2005(2) 28-29.

[26] 李根生 ,沈晓明 ,施立德 ,等. 空化和空蚀机理及其影响因素[J]. 石油大学学报 :自然科学版 ,1997 ,21(1) :97-102.

[27] 廖振方 ,陈德淑 ,邓晓刚 ,等. 利用空化射流清洗湖泊[J]. 清洗世界 ,2004 ,20(4) :1-6.

[28] 马凤山 ,蔡祖煌. 论海水入侵综合防治应用技术[J]. 中国地质灾害与防治学报 ,2000 ,11(3) 74-78.

[29] 槐文信 ,童汉毅 ,邹东明. 关于气泡羽流积分模型中的两个问题[J]. 武汉水利电力大学学报 ,2000 ,33(6) :1-4.

[30] 王双峰 ,李炜 ,槐文信. 均匀环境中气泡羽流的数值模拟[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1999 ,33(3) :1-8.

[31] 王双峰 ,槐文信 ,李炜. 静止均匀环境中气泡射流特性的研究[J]. 水科学进展 ,2000 ,11(1) 25-37.

[32] 王双峰 ,李炜 ,槐文信. 气泡羽流的双流体两方程湍流模型[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1999 ,33(2) :1-7.

[33] 马霞 ,李建中 ,魏文礼 ,等. 气泡羽流的数值模拟[J]. 西安理工大学学报 ,2001 ,17(1) 86-89.

(收稿日期 2005-10-10 编辑 徐 娟)

欢迎订阅 2007 年《水资源保护》 全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

《水资源保护》是河海大学和环境水利研究会主办的科学技术期刊。本刊 1985 年创刊 ,统一刊号 :CN32-1356/TV 现为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和江苏省一级期刊 ,国内外公开发行。

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究 ,应用技术 ,工程措施 ,综合述评 ,专题讲座 ,国外动态 ,书刊评介 ,科技简讯 ,水资源管理、评价、监测、优化配置 ,节水技术 ,水环境污染控制等方面的文章。近年来 ,本刊重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向 ,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容。

主要读者对象 :全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理干部以及大专院校的师生。

《水资源保护》邮发代号 28-298 ,双月刊 ,8 元/期 ,全年 48 元 ,每逢单月 30 日出版。欲订购者 ,请向当地邮局订购。若无法从邮局订阅 ,亦可与编辑部联系索取征订单。

地址 210098 南京市西康路 1 号 河海大学《水资源保护》编辑部

电话 (025)83786642 传真 (025)83786642

电子信箱 bh@hhu.edu.cn