



China Environmental Hydraulics
and Eco-Hydraulics 2010

中国环境与生态水力学

2010

陈永灿 黄真理 陈 进 刘昭伟 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

要 参 考 内

中国环境与生态水力学

2010

陈永灿 黄真理 陈 进 刘昭伟 编

中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店
中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	各 地 分 店	中 国 水 利 水 电 出 版 社	各 地 分 店	各 地 分 店



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共收录论文 80 多篇, 主要从水环境模拟与应用、水环境机理试验与评价方法、水污染防治与水资源保护、生态调度与生态水力学四个方面介绍了近年来我国在环境水力学领域所取得的理论和实践研究的最新成果。

本书适合环境保护、水利工程、电力工程、市政建设等相关部门的研究人员、技术人员和管理人员参考, 也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

中国环境与生态水力学. 2010 / 陈永灿等编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-5084-7948-4

I. ①中… II. ①陈… III. ①环境水力学—中国—文集②生态学—水力学—中国—文集 IV. ①X52-53②TV13-05

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第191193号

书 名	中国环境与生态水力学 2010
作 者	陈永灿 黄真理 陈进 刘昭伟 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 36.75 印张 871 千字
版 次	2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	108.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

第九届全国环境与生态水力学学术研讨会 2010 年 10 月在武汉召开。这次会议由中国水利学会水力学专业委员会（环境与生态水力学学组）主办，长江水利委员会长江科学院承办。

中国水利学会水力学专业委员会环境与生态水力学学组（原名为环境水力学学组）成立至今已经 21 年，伴随着学科的发展学组也有了长足的发展与进步，现有成员单位 32 个，成员 52 名，其中顾问 7 名，委员 45 名，涵盖了全国从事相关研究的大部分单位。

环境与生态水力学学组的发展大致经过两个重要阶段。从 1989~2000 年，在学组老一辈学者的大力倡导和组织下，分别在武汉、北京、西安举办了前三届学术研讨会，并在《水利学报》上出版了专刊；与此同时，学组还邀请著名学者来华讲座，组织青年学者和研究生参加国际环境水力学会议等研讨会，大力培养青年科技英才；1999 年，学组组织出版了李炜主编《环境水力学进展》，反映了中国环境水力学取得的最新成果。在这一时期，环境水力学的一辈学者和专家为中国环境水力学研究的蓬勃发展以及学组的逐渐壮大做出了重要贡献。

2000 年 9 月，在成都召开的第四届全国环境水力学研讨会期间，学组完成了新老更替，一批中青年学者积极开展学术交流活动，并制定了《中国水利学会水力学专业委员会环境水力学学组章程》。这一时期，学组的活动逐渐规范，特色更加鲜明，学术研讨会也越来越具有吸引力。自 2002 年开始，学组坚持了两年一次的学术会议，正式出版了会议论文集。论文集在注重论文质量的前提下，保持论文体例与文集外观等总体风格不变，迄今为止已形成系列，独具特色。2006 年，为了适应时代的发展，拓展环境水力学的学科方向，在宜昌举行的第七届学术研讨会上，“环境水力学学组”更名为“环境与生态水力学学组”，并得到水力学专业委员会的批准和认可，吸引了更多相关学者参加学组的活动；为了学科的长远发展，培养环境水力学的后备人才，提高研究生的研究兴趣与学术水平。在四川大学的支持下，于 2008 年贵州会议上设立了学生论文奖，鼓励提高研究生的论文水平和质量。这些工作使得研讨会的影响和声誉日渐扩大，论文集的引用率越来越高。

两年一次的全国环境与生态水力学学术研讨会是老中青学者开展学术交流的一个重要平台。在学组成员单位和全体委员的大力支持下,2010年第九届全国环境与生态水力学学术研讨会将如期在武汉举行。这次会议的论文集共收录论文84篇,包括水环境模拟与应用(20篇)、水环境机理试验与评价方法(19篇)、水污染防治与水资源保护(19篇)、生态调度与生态水力学(26篇)四个专题。会议论文集将继续由中国水利水电出版社正式出版,其中18篇优秀论文同时刊登在《长江科学院院报》上,以进一步扩大会议和成果的影响。在这里感谢中国水利水电出版社和《长江科学院院报》杂志编辑部的大力支持。

这次会议承办单位长江科学院为会议的筹备与组织、论文的征集与出版等做出了大量的工作。各成员单位,特别是清华大学、中国水利水电科学研究院、四川大学、长江科学院等在论文的审查和修改中给予了大力的支持。四川大学“赵文谦环境水力学奖学金基金”将继续奖励高水平的研究生论文。论文集的出版得到了清华大学水沙科学和水利水电工程国家重点实验室统筹项目(2009-TC-2)及国家自然科学基金重点项目(51039002)的资助。在此,向所有为会议成功召开和论文出版做出贡献的单位和个人表示由衷的谢意!

陈永灿

环境与生态水力学学组组长
清华大学土木水利学院院长

2010年9月12日

目 录

前言

水环境模拟与应用

明渠混合污染物侧向和垂向扩散系数的计算方法

及其应用 武周虎 胡德俊 徐美斌 (3)

河网模拟 JPWSPC 方法和分级解法的对比 朱德军 陈永灿 刘昭伟等 (12)

深圳湾 NH_4-N 输移规律数值模拟研究 陶 亚 赵喜亮 任华堂等 (20)

长江河口南支太仓段三维水动力及水质数值模拟 顾 莉 (29)

基于 River2D 模式的鱼类急流浅滩栖息地变化研究 谭燕平 王玉蓉 陈海燕 (34)

高寒地区电站下游水温及冰情的影响预测研究 肖 剑 邓 云 脱友才 (40)

基于环境湍流的显格式代数应力模型研究进展 邢领航 黄国兵 (47)

一维恒定河流污染源识别反问题研究 刘晓东 谢增芳 华祖林等 (53)

东莞运河排涝对东莞水厂取水口水质影响 孙 磊 毛献忠 黄旻旻等 (58)

珠江口磨刀门水道咸潮入侵规律初步分析 胡 溪 毛献忠 (65)

强紊动掺气水体的两相流数值模拟 陈雪巍 程香菊 (71)

EFDC 模型温度分层流模拟及紊流模型参数

敏感度分析 任华堂 夏建新 陶 亚 (82)

浅水圆柱绕流流动模式探讨 李 玲 晏智锋 刘昭伟 (89)

强潮河口三维水沙输移过程数值模拟研究 马方凯 江春波 (96)

温州浅滩二期围涂工程水动力环境影响分析 郑敬云 金 毅 陈永灿等 (102)

CE-QUAL-W2 模型对水动力及水质预测的应用 程香菊 Hong Wang 等 (111)

水电站鱼道二维水流数值模拟研究 黄明海 周 赤 刘志雄 (116)

近岸海域温排水的三维数值模拟 崔 丹 金 峰 (124)

基于 InfoWorks RS 的三峡区间径流演进模拟 陈广才 肖 魁 (132)

三峡库区重庆段一维水流模型糙率修正分析 廖 康 吕平毓 (139)

水环境机理试验与评价方法

三峡工程运用对洞庭湖的水位及面积影响预测 刘大庆 杨大文 栾震宇 (145)

感潮河口污水候潮排放方式的探讨 李若华 赵 鑫 程杭平 (151)

高透水混凝土对水体污染物降解试验研究 王从锋 黄钰铃 刘德富 (157)

钱塘江水沙变异对河口健康的影响 潘存鸿 史英标 尤爱菊 (162)

大汶河和东平湖水环境质量比较分析与评价 朱 婕 武周虎 (169)

发电取水对库区污染带的影响研究	唐春燕 李 然 陈明千等	(176)
河流交汇区污染物输移扩散影响研究	康 鹏 李 然 冯镜洁等	(182)
竖缝式鱼道结构及水力特性研究	罗小凤 李 嘉	(189)
Health Assessment of Yellow River Delta wetland	Guo Bin Jiang Chunbo Yang Chen	(196)
四棘栅藻对汞和 DBP 协同作用的毒性研究	黄 茁 曹小欢	(205)
新邱露天矿区地下水环境现状及污染成因分析	胡红亮 刘国东 付 静等	(212)
人类重大工程对河口水动力及泥沙冲淤情况的影响	许炜铭 包 芸 赵佳蓓等	(218)
微絮凝砂滤工艺对生活污水进行深度处理的优化研究	陈 琛 程 文	(224)
三峡水库香溪河支流流域二氧化碳排放通量初步 观测研究	赵 炎 曾 源 吴炳方等	(230)
天然河道中鱼类对水深、流速选择特性的初步观测 ——以长江江口至浣市段为例	杜 浩 班 璇 张辉等	(237)
间歇曝气、生物填料对人工湿地去污性能的影响	汤显强 黄岁樑 金峰等	(244)
三湾水利枢纽鱼道物理模型试验研究	郭维东 梁 岳 孙 磊等	(251)
微波—活性炭联用对焦化废水中氨氮和 COD 的同时 去除研究	林 莉 李青云 王振华等	(256)
三峡水库支流库湾低流速条件下测流方法探讨	马 骏 刘德富 纪道斌等	(261)

水污染防治与水资源保护

湘江近年枯季低水位问题及解决对策	陈 进 黄 薇	(271)
流域水资源保护补偿标准计算模型	禹雪中 杨桐鹤 骆辉煌	(277)
城市小流域水资源管理中环境流量的简单设定方法	郭 辉 金 峰	(284)
流域水污染物排放权交易比率技术框架研究	骆辉煌 禹雪中 马 巍	(289)
城市滨水区景观设计中的水环境问题探讨	陈媛媛 高学平 张 晨	(295)
城市化对河流湖泊水生态和水环境的影响浅析	高 亮 茅泽育 刘 颖	(302)
关于农田生态系统管理控制三峡库区非点源污染 的思考	郭 胜 李崇明 张 韵等	(309)
重庆市水库型饮用水源地水质安全评价	张 韵 李崇明 封 丽等	(316)
基于基尼系数的额尔古纳河流域降水径流不均匀性 分析	轩 玮 李 翀 赵慧颖等	(323)
低等级公路灾后恢复重建水土保持研究	余世娇 刘国东 胡红亮	(329)
水库降等与报废的善后处理技术	程卫帅 黄 薇 刘 丹	(335)
利用自然资源产权理论对我国水权发展的研究	刘 强 黄 薇 唐纯喜	(342)
城市湿地保护研究 ——以三垱湿地为例	吴 建 程 文 詹中英等	(350)
基于模糊模式识别的西南地区水土流失防治标准值的确定	李佳蕾 刘国东	(354)
沧州市城市饮用水水源保护区入河排污口整治探讨	王长明	(359)
湖泊使用功能损害造成的经济损失研究	周 洋 周孝德	(365)

南方季节性缺水灌区生态节水模式和实时灌溉预报研究	刘凤丽 黄国兵 (370)
一种新型水力旋流器在合流制雨污水处理中的应用	张 洋 陈飞勇 金 峰 (376)
川西高原与成都平原过渡地带工程建设水土流失防治研究	任玉峰 刘国东 (381)

生态调度与生态水力学

长江流域控制性水库联合调度体制及机制探讨	
——以湘江抗旱调度为例	黄 薇 陈 进 (389)
三峡小江回水区藻类集群与主要环境要素的典范对应	
分析研究	郭劲松 李 哲 张 呈等 (395)
影响潮间带湿地的环境水文因素	
——以海南东寨港红树林湿地为例	夏玉强 李海龙 (403)
基于遥感数据的呼伦湖水面面积变化及影响因素分析	
.....	余 晓 李 翀 轩 玮等 (409)
服务于生态调度的水利水电工程生态效应评价指标体系	
.....	冯顺新 王俊娜 李 翀等 (416)
钉螺适宜孳生地环境与水情变化响应关系研究	马 巍 廖文根 匡尚富等 (429)
人类活动对生态环境的影响	
——以长江鱼类资源为例	刘明典 熊 飞 陈大庆 (437)
水库生态调度研究综述	郭文献 王鸿翔 徐建新等 (446)
三峡水库蓄水前后春季长江口鱼类浮游生物群落结构特征	刘淑德 线薇微 (456)
长江流域生态调度的实施条件及推进策略分析	王 波 黄 薇 (464)
中小河流生态径流计算研究	余文公 (471)
三峡库区嘉陵江优势藻类演替与生长性态研究	封 丽 李崇明 张 韵等 (477)
流域生态水文分区浅析	翟正丽 彭 静 李 翀 (484)
金沙江下游梯级水库配合三峡水库联合防洪调度	
效果分析	杨春花 许继军 董玲燕 (491)
环境流量研究方法与实践	郭建威 黄 薇 (498)
水库生态调度及其实施步骤方法探讨	尹正杰 黄 薇 (504)
太子河流域本溪段水生态承载力研究	李 靖 周孝德 程 文等 (509)
1998~2001 年长江口近海鱼类群聚结构及其与环境因子	
的关系	于海成 线薇微 (517)
中华鲟自然繁殖发生与水文状况适合度之间的关系	张 辉 危起伟 杜 浩等 (523)
沼蛤的研究现状及控蛤措施综述	付小莉 宾零陵 (534)
蓝藻去除与分离技术	曹富强 陈飞勇 金 峰 (540)
浮床栽培小白菜净化富营养化水体研究	桑连海 黄 薇 (545)
三峡水库香溪河干支流 2009 年春季硅藻水华动态	
研究	方小凤 刘德富 杨正健等 (550)
2009 年高岚河春季水华生消过程及藻类种源探讨	陈媛媛 刘德富 杨正健等 (559)
电站非恒定流对航运安全的影响研究	梁 曦 邓 云 (568)
连续性冰盖对矩形渠道纵向离散特性的影响研究	王志刚 陈永灿 (575)

水环境模拟与应用

明渠混合污染物侧向和垂向扩散系数的计算方法及其应用*

武周虎 胡德俊 徐美娥

(青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东青岛 266033)

摘 要 明渠的侧向和垂向扩散系数是衡量岸边水流对污染物质混合输移能力的重要水质参数之一, 其值的准确与否直接关系到明渠水质预测预报成果的可靠性。基于污染混合区的理论计算方法, 推导了污染混合区外边界标准曲线和曲面的统一方程, 包含最大长度 L_s 、最大宽度 b_s 和最大深度 d_s 等特征尺度。该曲线形状近似于半椭圆, 曲面形状为近似椭球体的一部分, 表明污染混合区具有相似性。给出了由岸边污染混合区外边界最大长度、最大宽度或最大深度和平均流速确定侧向或垂向扩散系数的计算公式, 提出了采用污染混合区面积或体积进行总体控制的侧向或垂向扩散系数计算方法和采用水面横向积分浓度确定垂向扩散系数的实用方法。通过现场观测结果分析, 给出了洸府河下游河段枯水期的侧向扩散系数 $E_y = 0.27 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

关键词 明渠 污染混合区 标准曲线 侧向扩散系数 垂向扩散系数 计算方法

1 引言

明渠沿岸地区工业或城镇生活污水经处理达到相应的排放标准后, 大多数情况是通过管道或明渠实施岸边排放。污水首先在排污口近区稀释混合, 其次在水域的长度与宽度、深度方向逐渐移流扩散, 在排污口附近水域会形成污染混合区^[1]。对于宽阔河流的污染混合区分布多属于二维问题^[2,3], 而对于宽阔深水水库的污染混合区分布则多属于三维问题^[4,5]。另一方面, 明渠岸边附近水体常常是人们生产生活用水对水质要求较高的区域, 对大江大河来说, “总体水质”不超标, 并不意味着“岸边水质”不超标。“岸边水质”对应“岸边环境容量”^[6]。

明渠的横向和垂向扩散系数是衡量水流对污染物质混合输移能力的重要水质参数之

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (50979036), 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07210-007-01)。

作者简介: 武周虎 (1959—), 男, 陕西省岐山县人, 教授, 硕士, 主要从事环境水力学与水污染防治研究。

一, 其值的准确与否直接关系到明渠水质预测预报成果的可靠性。目前国内外确定河流横向和垂向扩散系数的主要方法有理论公式、经验公式法和示踪实验法, 艾尔德采用对数流速分布函数, 在各向同性紊动条件下得出垂向扩散系数为

$$E_z = 0.067HU.$$

式中: H 为断面平均水深; U_* 为摩阻流速。

由于无量纲横向扩散系数经验公式 $\alpha_y = E_y/HU$, 一般认为其值为 $0.3 \sim 0.9$ ^[7], 所以横向扩散系数的计算结果是一个范围值, 其准确性难以判定。示踪实验法分为现场实验和室内实验, 示踪实验完成后可采用矩法^[8-14]、直线图解法^[15,16]、线性回归法^[17]、曲线拟合法^[18]、遗传算法^[19]、人工神经网络法^[20]等计算横向扩散系数。现场实验法计算结果比较可靠, 但河流实验受示踪剂的投放、取样等条件的限制; 室内实验多用于水槽中横向扩散系数与粗糙形式、宽度、水深、流速、摩阻流速等水力要素的关系研究。郑旭荣等^[21]借助于抛物线型断面形态方程, 提出了横向紊动扩散系数的断面分布及其平均值表达式。现行关于横向扩散系数的关系式和数值都是针对河流全断面混合特性的研究成果。实际工程中常见的多为岸边排放, 对于宽阔的明渠(如长江、黄河、三峡水库等)水流对污染物质混合输移能力主要取决于岸边混合扩散特性, 大江大河岸边污染混合区和岸边环境容量的计算往往只涉及到全断面宽度的数十分之一甚至于数百分之一, 选择采用全断面平均水深等水力要素确定的横向扩散系数显然不尽合理, 侧向扩散系数比横向扩散系数能更好地反映岸边水流的混合扩散特性。如三峡水库万州段的平均水深为 71m, 而岸边扩散区的水深比较浅, 并且往往处于一个由倾斜岸坡形成的角形变化域。

本文以顺直宽阔的明渠水流对污染物质的混合输移研究为背景, 基于武周虎等^[2-5]提出的岸边污染混合区理论计算方法, 推导污染混合区外边界等浓度标准曲线和曲面的统一方程, 提出确定侧向扩散系数和垂向扩散系数的计算公式。采用沱府河岸边污染混合区的现场观测结果计算其侧向扩散系数, 为进一步解决大江大河、水库岸边污染混合区和岸边环境容量的计算问题, 提供一定的参考研究。

2 侧向扩散系数计算方法

2.1 河流二维问题

河流保守物质平面二维移流扩散简化方程 $U \frac{\partial C}{\partial x} = E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$, 在等强度时间连续岸边垂向线源条件下的解析解^[2,3]:

$$C(x, y) = \frac{m}{H \sqrt{\pi E_y U x}} \exp\left(-\frac{U y^2}{4 E_y x}\right) \quad (1)$$

式中: x 为自排污口沿河流主流向的纵坐标; y 为垂直于 x 的横向坐标, 坐标原点取在岸边排污点; m 为单位时间的排污强度; U 为岸边水域平均流速; H 为平均水深; E_y 为岸

边排污的横向扩散系数, 又称侧向扩散系数^①。

由文献 [2] 给出的岸边污染混合区最大长度 L_s 、最大宽度 b_s 和相应纵坐标 L_c 以及面积 S 的理论计算公式分别为:

$$L_s = \frac{1}{\pi E_y U} \left(\frac{m}{HC_d} \right)^2, b_s = \sqrt{\frac{2E_y L_s}{eU}}, L_c = \frac{L_s}{e}, S = \left(\frac{2}{3} \right)^{1.5} \frac{\sqrt{\pi e}}{2} L_s b_s \quad (2)$$

式中: C_d 为河流排污引起的允许浓度升高值, 该值等于水环境功能区所执行的浓度标准值 C_s 减去背景浓度 C_b , 即 $C_d = C_s - C_b$, 其等浓度线所包围的区域为污染混合区。

由式 (2) 可以得到岸边污染混合区最大长度与最大宽度的比值为:

$$\frac{L_s}{b_s} = \sqrt{\frac{ePe}{2}} \quad (3)$$

其中 $Pe = UL_s/E_y$ 称为贝克来数, 表征物质的纵向移流量与侧向扩散通量的比值^[3]。即岸边污染混合区的长宽比与贝克来数 Pe 的 0.5 次方成正比。

将式 (2) 代入式 (1) 并令 $C = C_d$, 化简整理得到河流岸边污染混合区外边界标准曲线 (见图 1) 方程为:

$$\left(\frac{y}{b_s} \right)^2 = -e \frac{x}{L_s} \ln \left(\frac{x}{L_s} \right) \quad (4)$$

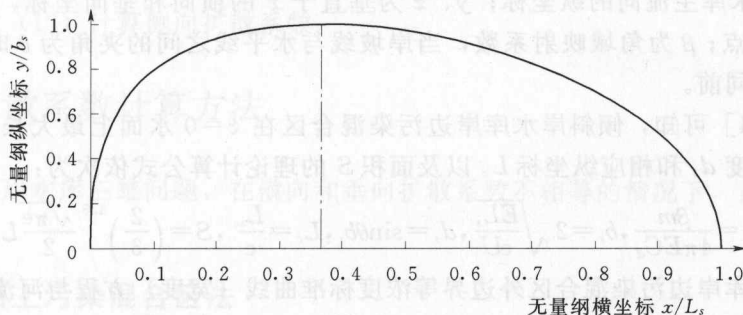


图 1 岸边污染混合区外边界标准曲线

由图 1 可以看出, 河流岸边污染混合区外边界标准曲线形状近似于半椭圆, 在靠近排污口一端出现钝头, 在污染混合区下游边界出现稍尖形状, 污染混合区最大宽度相应的纵坐标为最大长度的 $1/e \approx 0.368$, 说明污染混合区具有相似性。

由式 (2) 可以得到顺直宽阔河流侧向扩散系数的计算公式为:

$$E_y = \frac{eU}{2L_s} b_s^2, E_y = \frac{27US^2}{4\pi L_s^3}, E_y = \frac{1}{\pi UL_s} \left(\frac{m}{HC_d} \right)^2 \quad (5)$$

式 (5) 给出了侧向扩散系数的 3 个计算公式。表明顺直宽阔河流侧向扩散系数与岸边污染混合区最大宽度的 2 次方成正比, 与平均流速的 1 次方成正比, 与最大长度的 1 次方成反比。说明在平均流速相同的条件下, 污染混合区最大长度越大侧向扩散系数越小, 最大宽度和面积越大侧向扩散系数越大。在实际应用中, 可根据岸边污染混合区的现场观测结

① Mixing Zone Technical Procedures Manual (DRAFT), Idaho Department of Environmental Quality, USA, 2008. 8.

果采用式 (5) 计算侧向扩散系数。

通常, 受天然河道地形的影响, 污染混合区的形状一般不会像式 (4)、图 1 所示的那么规则, 污染混合区最大宽度的测量受多种因素的影响也会存在变数。为了减小污染混合区最大宽度测量不准给侧向扩散系数计算带来的误差, 可以根据现场观测数据绘制污染混合区外边界等浓度曲线, 在污染混合区形状大体为上游出现钝头和下游出现稍尖的近似椭圆形情况下, 即在最大宽度相应的纵坐标大约为最大长度的 $1/e$ 时确定其面积 (其他形状污染混合区的侧向扩散系数较为复杂, 另文研究), 然后按照式 (5) 计算侧向扩散系数, 即采用污染混合区面积进行总体控制的侧向扩散系数计算方法, 下同。

2.2 倾斜岸水库三维问题

保守物质三维移流扩散简化方程 $U \frac{\partial C}{\partial x} = E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$, 对于横向和垂向扩散系数相等 ($E_x = E_y = E$) 的情况, 在顺直宽阔倾斜岸水库岸边等强度时间连续点源条件下的解析解为^[4]:

$$C = \frac{\beta m}{4\pi E x} \exp\left[-\frac{U(y^2 + z^2)}{4Ex}\right] \quad (6)$$

式中: x 为沿水库主流向的纵坐标; y 、 z 为垂直于 x 的横向和垂向坐标, 坐标原点取在库岸水面排污点; β 为角域映射系数, 当岸坡线与水平线之间的夹角为 θ 时, $\beta = 360^\circ/\theta$; 其他符号含义同前。

由文献 [4] 可知, 倾斜岸水库岸边污染混合区在 $z=0$ 水面上最大长度 L_s 、最大宽度 b_s 、最大深度 d_s 和相应纵坐标 L_c 以及面积 S 的理论计算公式依次为:

$$L_s = \frac{\beta m}{4\pi E C_d}, b_s = 2\sqrt{\frac{EL_s}{eU}}, d_s = \sin\theta b_s, L_c = \frac{L_s}{e}, S = \left(\frac{2}{3}\right)^{1.5} \frac{\sqrt{\pi e}}{2} L_s b_s \quad (7)$$

倾斜岸水库岸边污染混合区外边界等浓度标准曲线 (宽度) 方程与河流二维问题的式 (4)、图 1 相同, 污染混合区的空间形状为该等浓度标准曲线在 θ 角度上的旋转体, 是一近似椭球体的扇形截图。

由式 (7) 可以得到顺直宽阔倾斜岸水库侧向扩散系数的计算公式为:

$$E = \frac{eU}{4L_s} b_s^2, E = \left(\frac{3}{2}\right)^3 \frac{US^2}{\pi L_s^3}, E = \frac{\beta m}{4\pi C_d L_s} \quad (8)$$

顺直宽阔倾斜岸水库侧向扩散系数与平均流速和水面上污染混合区特征尺度的关系与河流情况相同, 只是系数减半。在实际应用中, 可根据倾斜岸水库岸边水面上污染混合区的现场观测结果采用式 (8) 计算侧向扩散系数。

2.3 垂直岸水库三维问题

保守物质三维移流扩散简化方程 $U \frac{\partial C}{\partial x} = E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + E_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$, 在顺直宽阔垂直岸水库岸边水面等强度时间连续点源条件下的解析解为^[5]:

$$C = \frac{m}{\pi x \sqrt{E_y E_z}} \exp\left(-\frac{Uy^2}{4E_y x} - \frac{Uz^2}{4E_z x}\right) \quad (9)$$

式中符号含义同前。

由文献 [5] 可知, 垂直岸水库岸边污染混合区在 $z=0$ 水面上最大长度 L_s 、最大宽度 b_s 以及面积 S 和在 $y=0$ 垂直面上最大深度 d_s 以及相应纵坐标 L_c 的理论计算公式依次为:

$$L_s = \frac{m}{\pi C_d \sqrt{E_y E_z}}, b_s = 2 \sqrt{\frac{E_y L_s}{eU}}, S = \left(\frac{2}{3}\right)^{1.5} \frac{\sqrt{\pi e}}{2} L_s b_s, d_s = 2 \sqrt{\frac{E_z L_s}{eU}}, L_c = \frac{L_s}{e} \quad (10)$$

垂直岸水库岸边污染混合区外边界等浓度标准曲线 (宽度和深度) 方程分别与河流二维问题的式 (4)、图 1 相同, 污染混合区的空间形状为四分之一近似椭球体的扁蛋形。将式 (10) 代入式 (9) 并令 $C=C_d$, 化简整理得到该曲面方程为:

$$\left(\frac{y}{b_s}\right)^2 + \left(\frac{z}{d_s}\right)^2 = -e \frac{x}{L_s} \ln\left(\frac{x}{L_s}\right) \quad (11)$$

由式 (10) 可以得到顺直宽阔水库侧向扩散系数的计算公式为:

$$E_y = \frac{eU}{4L_s} b_s^2, E_y = \left(\frac{3}{2}\right)^3 \frac{US^2}{\pi L_s^3} \quad (12)$$

顺直宽阔垂直岸水库侧向扩散系数与平均流速和水面上污染混合区特征尺度的关系与倾斜岸水库情况相同。在实际应用中, 可根据垂直岸水库岸边水面上污染混合区的现场观测结果采用式 (12) 计算侧向扩散系数。

3 垂向扩散系数计算方法

针对垂直岸水库三维问题, 在横向和垂向扩散系数不相等的情况下, 讨论垂向扩散系数的计算方法。

3.1 垂直面上污染混合区法

根据垂直面上岸边污染混合区外边界标准曲线的特征尺度, 按照与侧向扩散系数相同的方法, 由式 (10) 可以得到顺直宽阔水库垂向扩散系数的计算公式为:

$$E_z = \frac{eU}{4L_s} d_s^2, E_z = \left(\frac{3}{2}\right)^3 \frac{US_z^2}{\pi L_s^3} \quad (13)$$

式 (13) 表明顺直宽阔垂直岸水库垂向扩散系数与垂直面上岸边污染混合区最大深度的 2 次方成正比, 与平均流速的 1 次方成正比, 与最大长度的 1 次方成反比。说明在平均流速相同的条件下, 污染混合区最大长度越大垂向扩散系数越小, 最大深度和面积越大垂向扩散系数越大。在实际应用中, 根据垂直岸水库岸边垂直面上污染混合区的现场观测结果采用式 (13) 计算垂向扩散系数。

3.2 岸边污染混合区体积法

根据岸边污染混合区体积计算垂直岸水库的垂向扩散系数是考虑到受天然水库地形的影响, 岸边污染混合区的空间形状一般不会像式 (11) 给出的那么规则, 垂直面上岸边污染混合区最大深度和面积的测量受多种因素的影响也会存在变数。为了减小垂直面上岸边

污染混合区最大深度和面积测量不准给垂向扩散系数计算带来的误差,可以根据现场观测数据采用数值积分求和方法计算岸边污染混合区(云团)的体积,然后根据岸边污染混合区体积进行总体控制计算垂向扩散系数。

由文献[5]可知,垂直岸水库三维问题岸边污染混合区体积的理论计算公式为:

$$V = \frac{\pi e}{16} b_s d_s L_s \quad (14)$$

由式(10)和式(14)可以得到顺直宽阔水库垂向扩散系数的计算公式为:

$$E_z = \frac{16}{E_y} \left(\frac{UV}{\pi L_s^2} \right)^2 = 1.62 \frac{U^2 V^2}{E_y L_s^4} \quad (15)$$

式(15)表明顺直宽阔垂直岸水库垂向扩散系数与平均流速和岸边污染混合区体积的2次方成正比,与最大长度的4次方成反比,与侧向扩散系数的1次方成反比。说明在平均流速相同的条件下,岸边污染混合区最大长度和侧向扩散系数越大垂向扩散系数越小,污染混合区体积越大垂向扩散系数越大;在侧向扩散系数相同的条件下,平均流速和体积越大垂向扩散系数越大,而岸边污染混合区最大长度越大垂向扩散系数越小。

在实际应用中,根据垂直岸水库岸边污染混合区的现场观测结果采用式(15)计算垂向扩散系数。观测数据包括岸边污染混合区范围内的平均流速、岸边污染混合区的最大长度和体积以及由2.3节中计算方法观测求得的侧向扩散系数。

3.3 水面横向浓度积分法

当 $z=0$ 时,由式(9)得到垂直岸水库三维问题的岸边水面等强度时间连续点源条件下的水面污染物浓度分布为:

$$C = \frac{m}{\pi x \sqrt{E_y E_z}} \exp\left(-\frac{Uy^2}{4E_y x}\right) \quad (16)$$

将式(16)对 y 积分得到水面横向积分浓度 C_{wl} 为:

$$C_{wl} = \frac{m}{\pi x \sqrt{E_y E_z}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{Uy^2}{4E_y x}\right) dy = \frac{2m}{\pi \sqrt{E_z U x}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{Uy^2}{4E_y x}\right) d\left(\sqrt{\frac{U}{4E_y x}} y\right) \quad (17)$$

进行变量替换,令 $\eta = \sqrt{\frac{U}{4E_y x}} y$,并注意到 $\int_0^\infty \exp(-\eta^2) d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$,则有:

$$C_{wl} = \frac{2m}{\pi \sqrt{E_z U x}} \int_0^\infty \exp(-\eta^2) d\eta = \frac{m}{\sqrt{\pi E_z U x}} \quad (18)$$

由式(18)可以看出,水面横向积分浓度公式中没有出现侧向扩散系数 E_y 。这样就可以根据垂直岸水库岸边排污口下游距离 x_0 处水面横向浓度分布的观测资料求得水面横向积分浓度 C_{wl} ,然后利用下式计算垂向扩散系数:

$$E_z = \frac{1}{\pi U x_0} \left(\frac{m}{C_{wl}} \right)^2 \quad (19)$$

式(19)表明顺直宽阔垂直岸水库垂向扩散系数与平均流速和排污口下游距离的1次方成反比,与水面横向积分浓度的2次方成反比,与排污强度的2次方成正比。说明在排污强度相同的条件下,水面横向积分浓度越大垂向扩散系数越小。即垂向扩散系数越小,向深水区扩散的污染物就会越少,大量污染物就会聚集在水面附近的浅层水体。对水库水面中

心排放条件式 (19) 同样适用, 此时水面横向积分浓度 C_{wi} 的积分区间是断面全宽度。

根据水面横向浓度积分法计算垂向扩散系数, 使现场观测工作得到了大大地简化, 无需在深水区大量采样观测其空间浓度分布。观测水面横向浓度分布既省时省力, 又容易保证观测精度。建议水面横向浓度分布的观测选在污染混合区最大宽度出现的断面附近, 该断面污染物浓度相对较高, 污染物浓度分布较宽, 有利于保证精度。

4 现场观测结果分析

洸府河发源于泰山山脉, 流经泰安、济宁两地市入南四湖的南阳湖北端, 流域面积 1331km^2 。作者于 2005 年 3 月枯水期调研时, 在济宁市洸河路大桥附近右岸发现某淀粉厂向洸府河大量排放超标淀粉废水, 在排污口附近下游形成清晰可辨的白色污染混合区, 当即进行了现场拍照和测量, 图 2 给出了该淀粉厂岸边排污口污染混合区现场观测示意图。经现场测量该淀粉厂岸边高浓度白色污染混合区外边界最大长度 L_s 和最大宽度 b_s 分别为 32m 和 5m, 最大宽度相应的纵坐标 L_c 为 12m, 污染混合区范围内的平均流速 U 为 0.25m/s , 该河段水面宽度 B 为 72m。

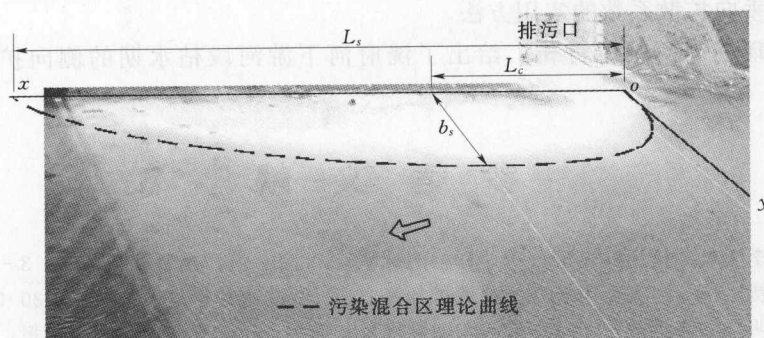


图 2 洸府河某淀粉厂岸边排污口污染混合区现场观测示意图

洸府河顺直宽阔, 而且纵向移流作用较强, 排放岸边高浓度白色污染混合区的色度基本不受对岸边界反射的影响。将现场观测的最大长度和最大宽度代入式 (4) 得到该淀粉厂岸边高浓度白色污染混合区外边界 (等色度) 曲线方程为:

$$y = 5 \sqrt{-e \frac{x}{32} \ln\left(\frac{x}{32}\right)} \quad (20)$$

由式 (20) 绘制的污染混合区理论曲线见图 2。由图 2 可以看出, 由现场观测的最大长度和最大宽度确定的污染混合区理论曲线与拍照的该淀粉厂岸边高浓度白色污染混合区外边界吻合良好, 最大宽度相应的纵坐标理论值 $L_c = L_s/e = 11.8\text{m}$ 与现场观测值 12m 非常接近, 说明河流保守物质平面二维移流扩散简化方程以及由此得到的理论公式适用于洸府河污染混合区的计算。因此, 可采用式 (5) 计算洸府河侧向扩散系数为:

$$E_y = \frac{eU}{2L_s} b_s^2 = \frac{2.71828 \times 0.25}{2 \times 32} \times 5^2 = 0.27 (\text{m}^2/\text{s})$$

顺直宽明渠混合污染物侧向扩散系数计算方法涉及的现场观测数据主要是岸边污染混