

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.022

河口海岸污水稀释扩散特性的试验研究

叶涛焱, 杭锦程, 周晶晶, 林天耀, 宗凌韬, 罗成

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要:通过环形水槽排污试验,对河口海岸地区污水的掺混和输移特性开展试验研究,研究污水的喷射方向、排放高度、温度对污水在环境水体中输移扩散特性的影响,旨在为研究污水在河口海岸地区的掺混和输移特性提供参考依据。结果表明,污水在环境水体中的稀释扩散效果主要受水平方位角和竖直射流角度的影响,污水排放方向与环境水体流向夹角越小,在水体中完全扩散均匀所需距离越长。高温污水完全稀释扩散的距离要长于常温污水。在试验的有限水深范围内,污水的排放高度对污水的稀释扩散没有显著影响,污水在排放近区均未扩散到水深7.5 cm以上区域。

关键词:排污方式;污水扩散;河口海岸;环形水槽;物模试验

中图分类号:X143 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)04-0131-05

Experimental study on characteristics of sewage dilution and dispersion in estuarine and coastal areas

YE Taoyan, HANG Jincheng, ZHOU Jingjing, LIN Tianyao, ZONG Lingtao, LUO Cheng
(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A sewage discharge experiment was carried out using an annular flume to study the characteristics of the mixing and transportation of sewage water in estuarine and coastal areas. The effects of sewage ejection direction, sewage discharge height, and temperature on the characteristics of transportation and dispersion of sewage in environmental water were investigated, providing references for this study. The experimental results show that the dilution and dispersion of sewage in environmental water are mainly affected by the horizontal and vertical angles. With a smaller the angle between the environmental water flow direction and the sewage water discharge direction, the distance required for homogeneous dispersion of sewage in the water will be longer. High-temperature sewage requires a longer distance for thorough dilution and dispersion than normal-temperature sewage. Due to the limited depth of water in the experiment, the height of sewage discharge had no significant effect on the dilution and dispersion of sewage, and no sewage dispersed to heights above 7.5 cm in the near field of discharge.

Key words: sewage discharge method; sewage dispersion; estuarine and coastal areas; annular flume; physical experiment

河口海岸是海陆相互作用最为活跃、对人类活动响应最为敏感的区域。随着社会经济的发展,大量的污水排入河口海岸水域中,近海水质恶化^[1]。河口海岸水域受径流、潮流、波浪^[2]等多重水动力作用,污水在这种水环境中的掺混、稀释、输移与扩

散有其特殊的规律。清楚认识河口海岸污水排放的掺混和输移特性,已成为海岸动力学、海洋环境学和环境流体力学研究的重点和热点。笔者通过环形水槽排污试验,分析污水排放后环境水体的污水浓度场分布规律,研究污水的喷射方向、排放高度、温度

基金项目:国家自然科学基金(201285312);高等学校博士学科点专项科研基金(20110094120020)

作者简介:叶涛焱(1995—),男,本科生,研究方向为河口海岸水动力。E-mail:985287941@qq.com

通信作者:周晶晶,博士。E-mail:zjj@hhu.edu.cn

对污水在环境水体中的输移扩散特性的影响。试验结果可作为数学模型参数调试的基础数据,为研究污水在河口海岸环境水体中的掺混和输移特性提供参考依据。

1 研究现状

河口海岸地区污水排放工程中,污水通常以射流的形式排放到周边水体中,即从排放口以较高流速进入环境水体,并与之发生强烈掺混^[3]。污水排入环境水体后,其运动过程从空间上看,可以划分为近区和远区。在近区,污水的稀释规律主要取决于排放方式、排放流量、初始密度、密度差、温度等参数,其稀释为“主动”稀释。远区是指距离排放口较远的区域,在该区域,污水的稀释通过环境水体的输移和自身扩散来完成,其稀释为“被动”稀释。

国内外学者进行了大量有关污水排放后在其附近水域内输移扩散特性的研究。针对污水射流的流场特性,Lam等^[4]研究了不同流速比下反向射流的流场特性;Chu等^[5]基于实验结果,得到环境水流影响下同向圆管射流以非线性规律展宽,且与射流速度和环境流速比有关;Baddour等^[6]对同向流动环境中二维表面射流的掺混特性进行研究,指出射流的竖向掺混对周围水体的流动作用非常敏感;张健等^[7]对流动环境中圆孔水平热射流进行了三维数值模拟,分析了流速比和射流出口温度对热射流轨迹温度分布的影响。张光玉等^[8-9]针对污水扩散器主要设计参数对近区稀释扩散效果的影响,开展了直水槽物模试验研究。针对具体工程实例,李莉等^[10]通过物模试验研究了防城港海湾围填前后对低浓度污水扩散的影响;周智鹏等^[11]采用数值模型分析了大潮情况下南黄海辐射沙脊群西洋海域3种水深排放位置处达标污水输移扩散的范围及分布规律;刘成等^[12]通过Delft3D数学模型对长江口丰水期、枯水期的大、小潮情况下的流速场、潮位场及污水扩散场进行了研究。

多年来人们系统地开展了水环境中污染物输移扩散的试验模型和数学模型研究,提出了一些实用、有效的理论模型和计算方法,但由于河口海岸水流运动和污水射流运动的复杂性及描述其变化规律的困难性,使得现有的河口海岸三维水质动力学模型存在一些缺陷,不能如实反映污水排放后的输移扩散特性,故仍需要通过大量的物理模型试验来分析污水排放后的流场和浓度场分布规律,以作为数学模型参数调试的依据。国内外进行的探求污水在河口海岸水体中的掺混与输移扩散规律的水槽试验研究,大多针对低浓度污水,并大多在环境水体流态单

一的直水槽中进行,环形水槽恰好可弥补直水槽的部分缺陷,具有开展高浓度污水排污实验的有利条件,可充分体现密度差效应。环境水体具有弯曲流动、精度高、水槽水体可循环利用等特点,故有必要在环形水槽中进一步开展污水排放的输移扩散特性研究,以此来研究不同排放方式下,污水在环境水体中的输移扩散特性。

2 试验

2.1 试验设备

试验采用河海大学建造的D280环形水槽,其结构示意图见图1。该水槽尺寸为280 cm(外径)×240 cm(内径)×50 cm(高),沿外壁一周不同高度处设有取样孔,同时配套了控制系统和数据采集系统,能实现水槽运转时环形槽、剪力环的转速控制及剪力环的升降控制,并能通过微型电磁阀进行水样的遥控采集。王捷等^[13]通过试验研究,得出流速仅在边界处有较大的梯度,而在距离环形槽、剪力环表面较远的流场中心区域分布均匀,通常在实际应用中,对分层流速的精度要求不高时,流场中心区域的流速近似可以看成常数。试验采用自制的污水排放装置从环形水槽底部排放污水,该装置示意图见图2。该装置能改变污水的排放方式(排放高度、水平方位角、竖直射流角度),控制污水流量,通过遥控器和控制箱在水槽运转时控制排污,进行试验。

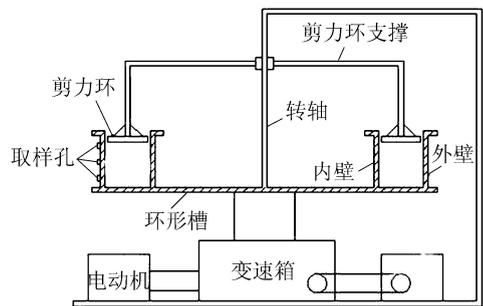


图1 环形水槽结构示意图

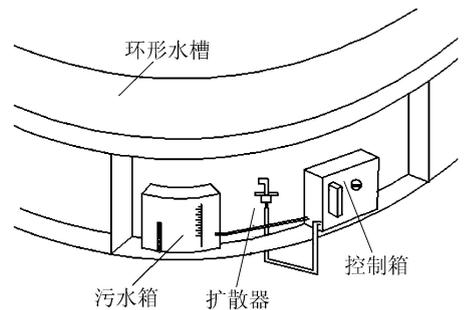


图2 污水排放装置示意图

试验中水槽上的取样孔分布见图3,为方便试验对取样孔进行编号1~8,图中箭头方向为水流方向(逆时针流动)。各取样口距水槽底部的高度及

排污口的水平距离见表 1。

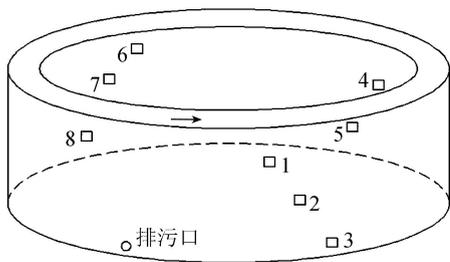


图 3 环形水槽取样孔分布示意图

2.2 试验条件及方法

试验污水采用 100 g/L 的氯化钠溶液, 试验采用 600 ml/min 的污水排放流量, 污水排放口径为 2 mm, 污水射流速度为 318.3 cm/s。通过预试验确定环形水槽水深采用 20 cm (因污水难以扩散到 20 cm 以上水面处), 环形水槽环形槽转速采用 62 r/min, 剪力环转速采用 115 r/min (转速太大或太小均不利于试验结果的分析)。试验中环形水槽水流横断面平均水流速度为 10.77 cm/s。

表 1 取样孔位置参数

取样孔编号	取样口高度/cm	距排污口水平距离/cm	取样孔编号	取样口高度/cm	距排污口水平距离/cm
1	13.8	133	5	5.5	366
2	7.5	142	6	15.8	661
3	1.8	155	7	9.8	671
4	11.5	356	8	3.8	681

试验采用电导率仪测量水样的电导率, 通过测量沿程各取样点在规定时刻(水槽内水流流过各取样点至水流转一圈间)的电导率, 由浓度和电导率之间的关系推求出污水排放后迁移扩散到水槽内各点后的稀释倍数 S , 计算公式^[14]为

$$S = (K_1 - K_0) / (K - K_0) \quad (1)$$

式中: K 为取样点实测的电导率; K_1 为初始排放污水的电导率; K_0 为水槽水体的初始电导率^[5]。

取样点的电导率差 ($K - K_0$) 及稀释倍数的变化均能反映出污水在不同排放方式下的稀释、扩散和输移情况的变化。

试验中通过改变污水的排放方式, 比较在不同排放方式下各取样点电导率差及稀释倍数的变化, 同一点电导率差越小, 稀释倍数越大, 说明在该种排放方式下, 更有利于污水在该处的扩散。试验过程中, 用极稀高锰酸钾溶液作污水染色剂, 以便观察污水在水槽中的运动规律, 污水排放的实验效果见图 4。

3 试验结果与分析

图 5 ~ 9 中, L 为污水排放的水平方位角 (在水平面上, 排放管出口与水流径向的夹角, 朝环形水槽外壁), V 为污水排放的竖直射流角度 (在竖直面),

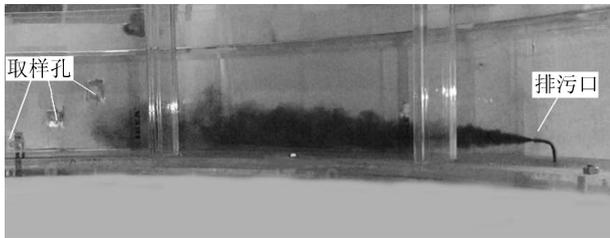


图 4 污水排放效果

排放管出口与铅垂线的夹角)。 H 为污水的排放高度 (排放管出口距水槽底部的竖直距离), T 为污水的排放温度。 L 与 V 的示意图见图 5。在不同污水排放条件下, 在试验的有限水深范围内, 在污水的排放近区 (距排污口 360 cm 内), 1、2、4 号测点在污水排放前后的电导率差极小, 稀释度极大, 故可认为污水均未扩散到 1、2、4 号测点, 即水深 7.5 cm 以上区域。在不同的污水排放方式下, 计算得到沿程各取样点的电导率差及稀释倍数变化 (图 6 ~ 9)。

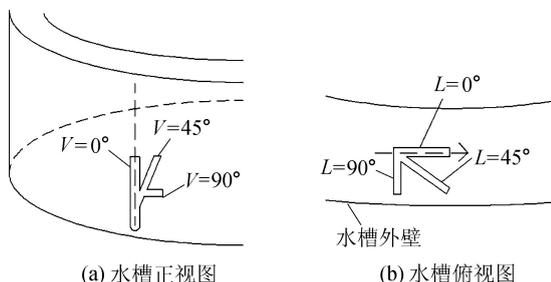


图 5 水平方位角和竖直射流角度示意图

3.1 水平方位角和竖直射流角度对污水稀释扩散的影响

在不同污水排放水平方位角和竖直射流角度下, 沿程各测点的电导率差变化见图 6 ~ 7。当竖直射流角度 $V = 90^\circ$ 时, 污水水平射流, 此时在排放近区 (距排污口 360 cm 内), 改变污水排放的水平方位角, 近区底部 (3 号测点) 的稀释倍数变化高达 41%; 当射流在水平面上垂直于环境水体水流方向 ($L = 90^\circ$) 射出时, 近区底部 (3 号测点) 的电导率差

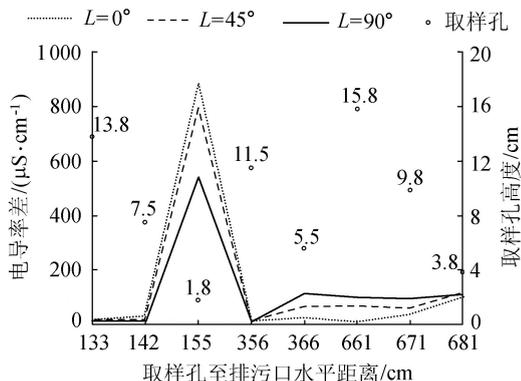


图 6 $V = 90^\circ$ 时, 不同水平方位角下各取样点电导率差 ($H = 3.1$ cm, $T = 16.9^\circ\text{C}$)

最小,为 543 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 稀释倍数最大,达到 115 倍。

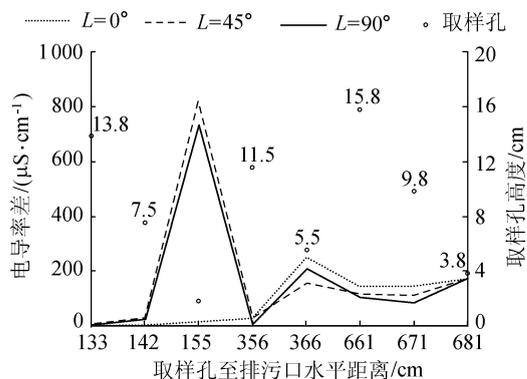


图7 $V=45^\circ$ 时,不同水平方位角下各取样点电导率差 ($H=3.1\text{ cm}, T=16.9^\circ\text{C}$)

在离排污口距离大于 366 cm 后的区域,各测点的电导率差和稀释倍数基本趋于一致,说明污水在环境水体中已经基本扩散均匀,这是因为污水自喷口出流后,受到水平面上流向与之垂直的环境水流的强烈扰动而较为迅速地在一定区域内扩展开来,故稀释扩散效果较为明显;当射流在水平面上沿环境水流方向($L=0^\circ$)射出时,近区底部(3号测点)的电导率差最大,为 888 $\mu\text{S}/\text{cm}$,稀释倍数最小,仅为 68 倍;在离排污口距离大于 366 cm 后的区域,由于受到水流夹带作用,污水在整个水流断面上稀释扩散最不均匀。当污水排放的水平方位角 $L=45^\circ$ 时,稀释扩散效果介于两者之间。

改变污水的竖直射流角度,当 $V=45^\circ$ 时,污水斜向上射流(图7),近区底部(3号测点)的电导率差最小可达 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$,稀释倍数高达 3000 倍,此时可近似认为污水未扩散到近区底部,并且污水对近区底部影响最小。图6与图7的对比还可发现,在离排污口距离大于 366 cm 的污水排放远区,污水斜向上射流时($V=45^\circ$),高于排污口高度的各区域(5~8号测点)的电导率差均比污水水平射流时($V=90^\circ$)大,尤其以 $L=0^\circ$ 时增大效果最为明显。这是由于污水斜向上射出后,具有向上运动的初始动量,从而使得污水能较多地向上扩散到上述区域。

3.2 温度对污水稀释扩散的影响

如图8所示,在排放近区(距排污口 360 cm 内),在不同温度的污水下,近区底部(3号测点)稀释倍数变化不超过 13%,且高温污水也仍未扩散到水深 7.5 cm 以上区域(因 1、2、4号测点电导率差极小,稀释倍数极大,说明污水并未扩散到该区域),说明污水的排放温度对污水排放近区污水的稀释扩散没有显著影响。随着离排污口距离的增大,常温污水各测点的稀释倍数趋于一致,但高温污水各测点的稀释倍数仍相差很大,说明高温污水完全稀

扩散的距离长于常温污水。

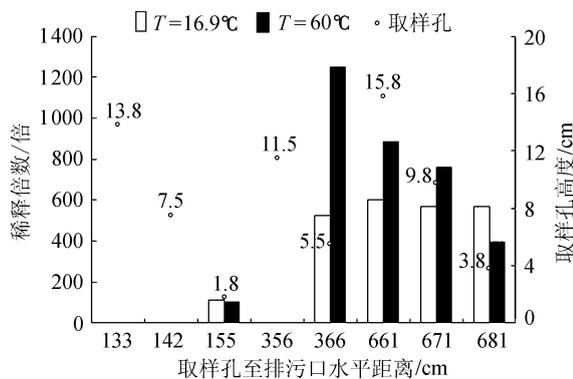


图8 温度影响下各点稀释倍数的变化 ($L=90^\circ, V=45^\circ, H=3.1\text{ cm}$)

3.3 排放高度对污水稀释扩散的影响

如图9所示,在排放近区(距排污口 360 cm 内),不同排放高度下,近区底部(3号测点)稀释倍数变化不超过 12%,且污水均未扩散到水深 7.5 cm 以上区域(因 1、2、4号测点稀释倍数极大,说明污水并未扩散到该区域),故在 1/4 试验水深范围(0~5 cm)内排污高度对污水排放近区影响不大;在距排污口距离大于 366 cm 后的区域,在不同排放高度下,各测点的稀释倍数趋于一致,表明排放高度对污水排放远区也影响不大。

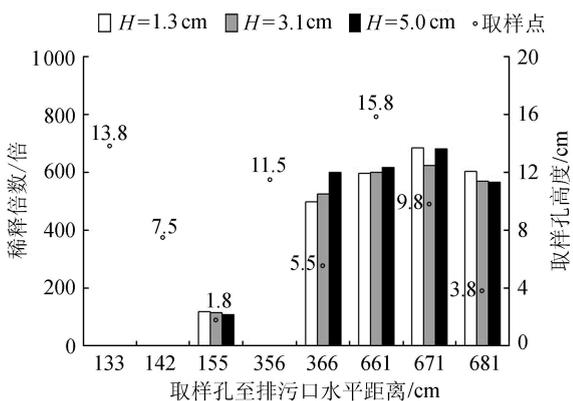


图9 高度影响下各点稀释倍数的变化 ($L=90^\circ, V=90^\circ, T=16.9^\circ\text{C}$)

4 结论

污水在环境水体中的掺混和输移扩散规律相当复杂,较难由单一的某一种排放参数决定,即使在水体环境相同时也受到众多污水排放参数的综合影响。通过环形水槽排污实验,采取不同排污方式,并根据试验测量数据,对污水稀释扩散情况进行了分析研究,结论如下:

a. 在不同排放方式下,在试验的有限水深范围内,在排放近区,污水均未扩散到水深 7.5 cm 以上区域。排放高度在 1/4 试验水深范围内对污水排放

近区污水的稀释扩散影响不大,污水的排放温度也对污水排放近区污水的稀释扩散没有显著影响,但高温污水完全稀释扩散的距离要长于常温污水。污水的稀释扩散效果主要受水平方位角和竖直射流角度的影响;

b. 当污水排放方向与环境水体流向夹角较小时,由于受到水流夹带作用,在排放近区底部污水稀释倍数较小,污水在较长距离都集中在一定区域内,在整个水流断面上稀释扩散较不均匀;

c. 改变污水的竖直射流角度,使污水向上射流时,能够非常有效地使污水在排放近区底部的稀释倍数变得极大;而改变污水的水平方位角,只能在有限范围内提高排放近区底部的稀释倍数。

参考文献:

[1] 陈吉余,陈沈良. 中国河口海岸面临的挑战[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(1): 1-5. (CHEN Jiyu, CHEN Shenliang. Estuarine and coastal challenges in China[J]. Marine Geology Letters, 2002, 18(1): 1-5. (in Chinese))

[2] 陶建华,韩光. 波浪对浅海近岸污染物输移扩散规律的影响[J]. 中国科学(E辑), 2003, 33(11): 1045-1056. (TAO Jianhua, HAN Guang. Effects of water wave motion on pollutant transport in shallow coastal water[J]. Science in China (series E), 2003, 33(11): 1045-1056. (in Chinese))

[3] 徐振山,陈永平,张长宽. 海岸动力环境下射流运动研究综述[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 438-444. (XU Zhenshan, CHEN Yongping, ZHANG Changkuan. Review of hydrodynamics of jet flow in coastal waters [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 438-444. (in Chinese))

[4] LAM K M, CHAN H C. Round jet in ambient counterflowing stream [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(10): 895-904.

[5] CHU P C K, LEE J H W, CHU V H. Spreading of turbulent round jet in coflow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(2): 193-204.

[6] BADDOUR R E, ZAGHLOUL A, MARTINUZZI R. Entrainment properties of plane surface-jets in shallow current [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(4): 363-370.

[7] 张健,杨立,张士成,等. 流动环境中圆孔水平热射流三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 668-673. (ZHANG Jian, YANG Li, ZHANG Shicheng, et al. 3D numerical simulation of round horizontal thermal jets in flow [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 668-673. (in Chinese))

[8] 张光玉,詹水芬,袁俊岭. 扩散器近区稀释扩散模型试

验研究[J]. 交通环保, 2005, 26(1): 1-3, 6. (ZHANG Guangyu, ZHAN Shuifen, YUAN Junling. Model test on dilution and diffusion in the area near diffuser [J]. Environmental Protection in Transportation, 2005, 26(1): 1-3, 6. (in Chinese))

[9] 于航,白景峰,王心海,等. 大水深条件下污水排放工程扩散器稀释扩散效果研究[J]. 水道港口, 2013, 34(4): 364-368. (YU Hang, BAI Jingfeng, WANG Xinhai, et al. Research on sewage marine discharge diffusion effect under deep water [J]. Journal of Waterway and Harbour, 2013, 34(4): 364-368. (in Chinese))

[10] 李莉,赵晓冬,尤薇,等. 防城港海湾污水扩散试验研究[C]//左其华,窦希萍. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 748-753.

[11] 周智鹏,陶建峰,张长宽,等. 南黄海辐射沙脊群西洋水道污水输移扩散研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 65-71. (ZHOU Zhipeng, TAO Jianfeng, ZHANG Changkuan, et al. Numerical simulation of sewage transport-diffusion in Xiyang channel on the radial sand ridges of the Southern Yellow Sea [J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 65-71. (in Chinese))

[12] 刘成,李行伟,韦鹤平,等. 长江口水动力及污水稀释扩散模拟[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(5): 474-483. (LIU Cheng, LI Xingwei, WEI Heping, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics and sewage diffusion in the Changjiang River Estuary [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2003, 34(5): 474-483. (in Chinese))

[13] 王捷,周晶晶,张长宽. 双向环形水槽流速分布规律试验研究[J]. 泥沙研究, 2014(5): 32-37. (WANG Jie, ZHOU Jingjing, ZHANG Changkuan. Experimental study on velocity distribution of two-direction rotating annular flume [J]. Journal of Sediment Research, 2014(5): 32-37. (in Chinese))

[14] 徐高田,韦鹤平. 污水在水体中的稀释扩散及稀释度的计算[J]. 环境污染与防治, 1997, 19(3): 42-44. (XU Gaotian, WEI Heping. Dilution and dispersion of wastewater in the sea outfall engineering and the dilution degree calculation [J]. Environmental Pollution & Control, 1997, 19(3): 42-44. (in Chinese))

(收稿日期:2015-07-29 编辑:彭桃英)

