

深圳市政污水排海工程对海域环境影响的数值模拟研究*

宋 强, 吴 航

(深圳市环境保护监测站, 深圳 518001)

摘 要: 深圳的污水排海工程的污染物分布研究, 是典型的近区、远区问题. 采用 $K-\epsilon$ 全场模拟, 效果理想, 结论对于排海工程的管理有重要的参考意义.

关键词: 深海排放; $k-\epsilon$ 全场模拟; 放流管爆裂; 外源影响

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) S2-0126-04

1 污水排海工程概况

污水排放工程的扩散管位于深圳市西南珠江口左岸妈湾港前沿水域, 距码头垂直距离约 1.2 km. 污水排海工程通过截流污管将福田区、南头区 (含华侨城) 及沿途一带的所有市政污水输送污水处理厂, 经一级处理后采用海底扩散器排

放. 根据设计方案, 该工程近、中和远期的污水排放量分别为 23.0、35.0 和 75 万 m^3/d . 其放流管段由竖井算起全长为 1 677 m, 其中水平扩散管长 486 m, 扩散管段分为三次变径, 共有 19 根上升管, 排口设计标高为 -10 m, 喷口流速为 3 m/s, 扩散管段及喷口的主要设计参数见表 1.

表 1 污水排海工程扩散管段设计参数

变径(mm)	扩散管段				喷口		
	各段长度(m)	该段上升管根数	上升管长度(m)	上升管间距(m)	上升管直径(mm)	开口直径(mm)	相同喷口直径个数
2600	270	11	11.90				
1600	162	6	12.40	27	900	150	19×8
900	54	2	12.75				

放流管基本与海域流线垂直, 扩散口设置在航道设计标高以下 1.0 m, 对航道基本没有影响. 进入下水道的污水经格栅、沉砂池处理后进入临时排放口. 污水的种类除生活污水外, 还包括印染等行业的工业污水.

实际排海的排放量见表 2. 1999 年日平均排污量为 13 万 m^3/d , 2000 年日均达 23 万 m^3/d , 预计 2001 排污量达到 30 万 m^3/d 以上. 从表中可看出, 污水净化厂的排污量逐年增加. 1999 年就已经达到 15 m^3/d 的设计排放量.

工程运行后污水净化厂 1994~2000 年各月

表 2 南山水质净化厂污水排放量表

	万 m^3/d											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1994	3.46	2.55	3.94	4.13	5.01	5.52	6.00	4.95	5.80	5.01	5.12	4.82
1995	3.18	3.32	4.24	4.24	4.17	4.93	5.01	5.05	3.50	4.39	4.63	3.23
1996	3.13	2.89	3.52	4.14	4.83	5.04	5.15	5.36	5.54	4.64	4.62	4.85
1997	4.47	3.54	4.67	3.94	4.71	4.86	6.85	8.71	6.28	5.48	5.28	5.44
1998	6.16	7.91	5.85	6.78	7.27	7.91	7.14	8.25	10.76	7.68	7.02	7.93
1999					13.14							
2000			19.40		23.71			26.0				23.08

* 收稿日期: 2001-08-03; 作者简介: 宋 强 (1963-), 男, 高级工程师, 享受国务院特殊津贴专家.

表3 南山水质净化厂排放口水质监测数据

监测时间	SS	BOD ₅	COD _{mn}	无机氮	D-P	大肠杆菌
			mg/l			个
19990526	136.0	63.69	37.05	27.0	2.84	1.2E5
19990831	171.0	39.80	32.22	16.31	2.74	6.1E7
19991123	105.5		39.14	25.58	3.07	6.0E7
20000320	76.0	86.41	27.70	30.57		7.4E4
20000518	83.0	62.86	19.20		1.42	9.7E4
20000816	65.2	61.21	32.23	23.01	3.0	1.2E6
20001206	82.0	95.78	42.30	29.11	1.86	3.1E4

表4 污水排海水质监测站位座标 (2000年)

点 位	北 纬	东 经	点 位	北 纬	东 经
1 #	22°29.698'	113°50.626'	5 #	22°29.352'	113°51.552'
2 #	22°30.562'	113°51.367'	6 #	22°29.834'	113°51.6339'
3 #	22°30.043'	113°51.447'	7 #	南山水质净化厂出口	
4 #	22°29.698'	113°51.500'			

说明: 4#站为放流管位置, 2#、3#和5#、6#分别在4#两侧, 1#对照站位于4#站对出海域, 7#为南山厂出口水位至出水口位置。根据污水排放量, 两年的监测站位稍有不同。

2 全场数学模型的应用

长久以来, 人们根据水体流动特点, 将受纳水域分为近区和远区, 近区着重考虑卷吸和掺混现象, 而远区中则主要考虑对流扩散。近远两区则分别用积分模型和扩散模型来处理, 这种方法简单易行, 但区域划分界限不明确, 而且其衔接也存在不少问题。对一个实际问题而言, 远、近区是相互联系的整体, 从排放口出来的污染物质, 随起始动量和浮力作用的逐步消失, 由近区进入远区。由于近区流动比较复杂, 将对复杂流动的近区精细模拟方法用于远区计算是不经济和不必要的, 而将对简单流动的远区计算方法用于近区是不合适的, 有时可能造成较大误差。

为了克服现有积分模型和远区扩散模型的缺点, 提出了一类全场模型, 全场模型有流场中各点不均匀的当地湍流输运系数出发, 利用近代湍流模型来封闭并求解雷诺时均方程组, 因而不受积分及扩散模型的限制, 摒弃了近远区人为的划分, 避免了区域衔接的困难, 预报的结果更为合理。

深圳的污水排海工程的污染物分布研究, 是典型的近区、远区问题。本研究采用全场模型模拟无机氮、悬浮物、活性磷酸盐、COD_{mn}及大肠杆菌五个污染因子在本海域内大潮和小潮两个潮型作用下的分布情况。

采用全场模型可以详细了解远区的污染物浓度分布, 结合本文提出的离散模式, 进一步可以预报各点污染物沿垂向的分布状况。

2.1 全场数学模型

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(H\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(H\rho\bar{V}_i) = 0$$

运动方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(H\rho\bar{V}_i) + \lambda \frac{\partial}{\partial x_i}(H\rho\bar{V}_i\bar{V}_j) = -\rho gH \frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \tau_i^s - \tau_i^b + H\rho\bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[H(\bar{\mu} + \mu_i) \left(\frac{\partial \bar{V}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (2)$$

湍动能方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H\bar{k}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho H\bar{V}_i\bar{k}) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[H \left(\frac{\mu_\epsilon}{\sigma_k} + D_{\bar{V},k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_i} \right] + \\ H(G_k^0 + G_w - \rho\bar{\epsilon}) \end{aligned} \quad (3)$$

深度平均湍动扩散量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H\bar{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho H\bar{V}_i\bar{\epsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[H \left(\frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} + D_{\bar{V},\epsilon} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_i} \right] \\ + H \left[\frac{\bar{\epsilon}}{k} (c_1 G_k^0 - c_2 \rho\bar{\epsilon}) + G_{\epsilon w} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

深度平均物质输移方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho H\bar{C}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho H\bar{V}_j\bar{C}) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left[H \left(\frac{\mu}{\sigma_c} + \mu_i + \rho D_{\bar{V},\tau} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right] + \end{aligned}$$

$$H(\bar{S}_0 + \bar{S}_d + \bar{S}_p) \quad (5)$$

$$\text{式中: } G_k^0 = \bar{\mu}_i \left[\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j} \right] \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial x_j}$$

$$G_{kv} = \bar{\mu}_i \left[\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial z} \frac{\partial \bar{V}_i}{\partial z} \right] = c_k \rho \frac{\bar{U}_*^3}{H} \quad (i = 1, 2)$$

$$G_{ev} = c_e \rho \frac{\bar{U}_*^4}{H^2}$$

$$\bar{U}_* = \sqrt{c_f(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)}$$

$$c_e = 3.6 \frac{c_2}{c_f^{3/4}} \sqrt{c_\mu}$$

$$c_f = \frac{g}{C_z^2}, \mu_t = C_\mu \rho \frac{\bar{k}^2}{\epsilon}$$

$$\tau_z^b = (g/C_z^2) \rho \bar{U} \sqrt{\bar{U} + \bar{V}}$$

$$\tau_y^b = (g/C_z^2) \rho \bar{V} \sqrt{\bar{U} + \bar{V}}$$

$$D_{y,c} = (0.404/\kappa^3) H U_*^*, \kappa = 0.41$$

式中, $\bar{U}, \bar{V}$ 相应于 x, y 方向的水深平均流速; $\bar{C}$ 水深平均浓度; $\bar{k}, \bar{\epsilon}$ 水深平均的湍动能及湍动能耗散率; g 为重力加速度; κ 为卡门常数; H 水深; C_z 为谢才系数; 系数 λ 为 $\frac{g + C_z^2 \kappa^2}{C_z^2 \kappa^2}$; $\bar{S}_0$ 为源汇项; $\bar{S}_d$ 为一级降解项; $\bar{S}_p$ 为污染物沉降作用项. 模型中通用常数如表 5.

表 5 湍流模型通用常数

c_1	c_2	c_μ	σ_k	σ_ϵ	σ_ϵ
1.44	1.92	0.09	1.0	0.9	1.3

为研究污水排放对海域水质的影响,有关部门对妈湾海域进行了多次水质调查. 1997 年 11 月 20~21 日, 1998 年 4 月 22 日, 1999 年 1 月 12~13 日, 5 月 26 日和 7 月 20 日. 这几次大面积的水质监测, 积累了大量水质数据, 我们通过几次的水质监测结果, 分析出不同污染物沿水深的垂向分布规律, 结合已有的全场水深积分模型的计算结果得出不同地点垂向污染物的分布情况. 具体算法如下:

污染物在各个点满足如下分布规律:

$$C = f(\bar{C}(x, y, t), z)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{H} \int_0^H C dz$$

其中: $\bar{C}$ 为垂向平均浓度分布, C 为瞬时浓度. x, y, z 为空间坐标, t 表示时间.

设在某点 (x, y) , 实测某时刻垂向浓度分布关系为: $C(x, y, z, t) = g(z, t)$, 则存在以下关

$$\text{系: } \frac{1}{H} \int_0^H g(z, t) dz = \bar{C}(x, y, t)$$

同时存在 m 个测点, 则有 $g_1, g_2, \dots, g_m$ 分布函数, 采用统计方法则可得到一般的分布规律 $\bar{f}$, 可以近似认为 $\bar{f} = f$, 这样就能够计算各个点浓度的垂向分布. 在排放器附近采用实际的分布规律进行模拟.

2.2 实测与计算结果评价

(1) 现状, 计算结果与实测基本一致. 在本海域内, 无机氮全面超过海水三类水质标准, 大肠杆菌与活性磷酸盐季节性超标. 悬浮物、化学需氧量均能满足三类水质标准.

(2) 污水排放量为 35 万 m^3/d , 数模计算结果表明本海域海水环境质量类别没有变化. 在五項水质指标中, 只有悬浮物与化学需氧量能够满足三类水质标准.

(3) 污水排放量为 75 万 m^3/d , 现有的污水海洋处置工程不满足正常运行条件, 要做新的规划设计. 本次计算假定在现有排放口的位置往北 1 km 处再增加一个新的排放口, 计算结果表明悬浮物、化学需氧量仍能满足三类水质标准, 而活性磷酸盐小潮时超过三类水质标准的面积大大增加.

3 结论与建议

(1) 通过潮流计算可知, 本海域潮流速度较大, 在计算区域内基本属于往复流, 污染物掺混比较充分. 排放管的位置水深可达 10 m, 而且潮流较强, 排放管道选址对污染物的稀释扩散是有利的.

(2) 近区计算结果, 以 COD_{mn} 为例, 在近区污水排海动量与浮力起主要作用的范围为长 2100 m, 宽 500 m.

(3) 海区各监测点近二年 BOD_5 、 COD_{mn} 浓度变化看出, 虽然 2000 年市政污水排放量大于 1999 年, 但各监测点的污染物浓度多数情况比 1999 年为低, 说明本区域海水水质受到外源的影响是主要的.

(4) 数值模拟计算结果表明, COD 、 SS 均符合海水三类水质标准. 由于小潮时段流速较小, 污染物不易扩散, 所以此时段海区内的污染物浓度较大潮时段高. 无机氮与大肠杆菌超标严重. 无机氮超标, 主要是由于本海区的无机氮本底值较高所引起的. 大肠杆菌的分布受季节影响比较大, 本次计算选取了不利的条件, 计算表明大肠杆菌超过

三类水质标准的范围大于给定混合区的范围. 建议在污水排海前, 加入适量的药剂进行杀菌, 减小大肠杆菌的影响范围.

(5) 据国内外有关混合区范围确定的资料, 对本评价海域, 我们提出混合区范围为 1.5km^2 . 要确切规定混合区的范围还需对放流管附近海域的功能区划给出功能目标, 才可真正确定这一范围.

(6) 污水的排放量达到 $75\text{万 m}^3/\text{d}$ 时, 放流管的喷口流速会大大增加, 超过设计标准 (3m/s), 长期运行必将减少放流管的使用寿命, 可能导致管道爆裂, 造成巨大经济损失. 根据这种情况, 建议另增加排放管, 进行污水的海洋处置. 有关新的

污水海洋处置的工程选址及相关技术参数确定, 需要进行相关的技术研究, 以达到污水海洋处置的最佳效果.

参考文献:

- [1] 张书农. 环境水力学. 南京: 河海大学出版社, 1988
- [2] 清华大学水力教研组译. 内陆及近海水域的混合, 北京: 水电出版社, 1987
- [3] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flow, *Comp Math in Appl Mech and Engrn*, Trans ASME, 1974, 3: 269
- [4] SAGAR B. J of Hydranlic Division, Proc. ASCE, 1982, 108 (1): 42 ~ 46
- [5] BARTON N G. J of Fluid Mech, 1983, 136: 243 ~ 267

Research on the Marine Environmental Impact from Shenzhen Municipal Sewage Discharge by Numerical Simulation Analysis

SONG Qiang WU Hang

(Shenzhen Environmental Protection Monitoring Station, Shenzhen 518001, China)

Abstract: The pollutant distribution of shenzhen municipal sewage in the coastal area is a typical near & far regional problems. Based on a review, and comparing of the study of the wastewater discharge in tidal flows, the investigation adopts $k-\epsilon$ model for the simulation and the results are satisfied. The results are quite important for the project management.

Keywords: project of sewage discharge on the sea; whole $k-\epsilon$ simulation; diffusion pipe burst effect of outer sources