

深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 数值模拟及减排效果分析

万由鹏^{1,2}, 毛献忠^{1*}

(1. 清华大学深圳研究生院环境工程与管理研究中心, 深圳 518055; 2. 浙江省水利河口研究院, 杭州 310020)

摘要:采用 EFDC 模型建立深圳湾三维水动力和营养盐模型, 模拟总无机氮 (TIN) 和正磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) 等主要营养盐在深圳湾不同水文条件下的输运规律。计算结果表明, TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的计算值和实测多年月均值枯、丰水期都吻合较好。内陆河流 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 减排方案的计算表明, 珠江口 TIN 提高至三类海水标准是深圳湾水体达标的前提; 在珠江口三类水质条件下, 不考虑降解作用, 减排 95% 时深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 基本达到三类海水水质标准功能区划的要求; 考虑降解作用, 减排 83% 时深圳湾可达到水体功能区划的要求。

关键词:深圳湾; EFDC 模型; 营养盐减排; 海域功能区划

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2011) 02-0384-08

Simulation and Evaluation on TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ Reduction in Deep Bay, China

WAN You-peng^{1,2}, MAO Xian-zhong¹

(1. Research Center for Environmental Engineering and Management, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), three-dimensional hydrodynamic and water quality models, are employed to simulate the transport of total inorganic nitrogen (TIN) and orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) in Deep Bay, China under different hydrologic conditions. It shows that, the computational results of TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ match very well with monthly-averaged field data in dry and wet seasons. The results of TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ reduction scenarios show that, it is necessary to reduce TIN concentration in Pearl River to Grade III to guarantee TIN in Deep Bay comply with the marine functional zonation requirement of the standard of Grade III. TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations in Deep Bay could comply with the marine functional zonation requirement if 95% TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ loading are reduced from the inflow when degradation ignores. When the degradation is considered, TIN could comply with the marine functional zonation requirement if 83% TIN loading are reduced from the inflow.

Key words: Deep Bay; EFDC model; nutrients reduction; marine functional zonation

深圳湾是半封闭浅水海湾, 位于珠江口伶仃洋东侧, 北接深圳特区, 南邻香港新界, 呈西南走向, 长约 14 km, 宽 4.5 ~ 6.5 km, 平均水深 2.9 m, 见图 1。深圳湾潮汐为不规则半日潮, 湾口平均潮差 1.37 m, 湾内潮流基本属于往复流。直接汇入深圳湾的主要内陆河流, 深圳一侧有大沙河与新洲河、香港一侧有元朗河、以及深港两地界河深圳河。深圳河是深圳湾的主要径流来源, 约占总径流的 70%。据 1995 年 11 月 ~ 1996 年 10 月和 1998 年 6 月 ~ 1999 年 6 月在深圳河落马洲断面流量测量^[1], 丰水期平均流量为 $27.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 枯水期为 $11.2 \text{ m}^3/\text{s}$, 枯水期径流基本来自污水, 丰水期 50% 以上径流是污水。因此, 内陆河流和深圳湾污染严重, 尤其是营养盐, 多年水质监测资料表明, 深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均超四类海水水质标准^[2], 达不到三类海水水质标准功能区划要求, 水体富营养化严重^[3], 本研究将主要分析 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 这 2 项重要的营养盐指标。

污染物减排及总量控制是改善海湾水质的根本

途径, 也是流域和海湾可持续发展的科学管理措施, 国内外的工程实践和科学研究都证明其重要性^[4-9]。深圳河湾水系要改善水质, 实现可持续发展, 必须实施污染物减排及总量控制的措施。近年来深圳市政府开展了大量工作, 包括污水截排工程、污水资源化工程等^[10]以控制污染物进入深圳河湾; 深圳河的二、三期整治工程^[11]不仅增强了深圳河的防洪能力, 也改善了水动力状况, 提高了排污能力。深圳近岸海域水质模拟以及水环境容量和污染物总量控制也有相关研究^[12, 13]。本研究利用 EFDC 模型, 建立深圳湾三维水动力和营养盐模型, 模拟湾内 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的输移过程, 分析多种减排方案的效果, 提出合适的减排方案, 以期为深圳河湾污染物减排及总量控制的研究和实践提供数据支持。

收稿日期: 2010-02-08; 修订日期: 2010-04-20

作者简介: 万由鹏 (1983 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为水环境模拟计算, E-mail: wyp_20020905@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: maooxz@sz.tsinghua.edu.cn

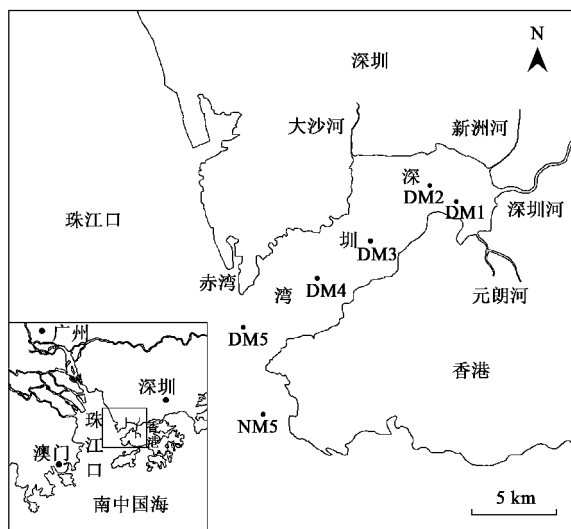


图1 深圳湾地理位置和采样点位置

Fig. 1 Location of Deep Bay and sampling sites

1 模型的建立

EFDC (environmental fluid dynamics code) 模型软件包是由美国维吉尼亚海洋研究所的 Hamrick 等^[4]开发的综合模型系统,包括水动力模块、泥沙输运模块、污染物输运模块和水质模块,是美国环保署推荐使用的河口海湾水动力水质模型. EFDC 模型采用垂向静压分布、自由表面假定的三维水动力方程. 在 σ 坐标变换 $z = (z^* + h) / (\zeta + h)$ 下,其连续方程、动量方程、状态方程、温盐方程和营养盐输运方程分别为:

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHu) + \partial_x(m_y Huu) + \partial_y(m_x Hvu) + \\ & \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv \\ & = -m_y H\partial_x(g\zeta + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z p + \\ & \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z u) + Q_u \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHv) + \partial_x(m_y Huv) + \partial_y(m_x Hvv) + \\ & \partial_z(mwv) + (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu \\ & = -m_x H\partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_y h - z\partial_y H)\partial_z p + \\ & \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z v) + Q_v \end{aligned} \quad (3)$$

$$\partial_z p = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} = -gHb \quad (4)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (5)$$

$$\partial_t(mHS) + \partial_x(m_y HuS) + \partial_y(m_x HvS) + \partial_z(mwS)$$

$$= \partial_z(mH^{-1}A_b\partial_z S) + Q_s \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHT) + \partial_x(m_y Hut) + \partial_y(m_x Hvt) + \partial_z(mwT) \\ & = \partial_z(mH^{-1}A_b\partial_z T) + Q_T \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y Hc) + \partial_x(m_y Huc) + \partial_y(m_x Hvc) + \\ & \partial_z(m_x m_y wc) - \partial_z(m_x m_y w_{sc}c) = \partial_x\left(\frac{m_y}{m_x}HK_H\partial_x c\right) + \\ & \partial_y\left(\frac{m_x}{m_y}HK_H\partial_y c\right) + \partial_z\left(m_x m_y \frac{K_v}{H}\partial_z c\right) + Q_c \end{aligned} \quad (8)$$

式中, z^* 表示垂向的物理坐标, $-h$ 和 ζ 分别是底面和自由水面的垂向坐标, $H = h + \zeta$ 是总水深, u 和 v 分别是曲线正交坐标系中 x 和 y 方向的速度分量, w 为垂向速度分量, m_x 和 m_y 是度量张量的对角元素的平方根, $m = m_x m_y$ 是雅克比行列式. p 是大气压, ρ 是水的密度, ρ_0 是水的参照密度, g 为重力加速度, 浮力 b 定义为相对于参考密度归一化偏移量. T 和 S 分别是温度和盐度. 动量方程中的 f 是柯氏力参数, A_v 是垂向紊动或涡旋黏度, Q_u 和 Q_v 是动量源汇项. 在盐、温输运方程(6)和(7)中, Q_s 和 Q_T 都是源汇项, A_b 是垂向紊动扩散系数. 在营养盐(或悬浮物质)的输运方程中, c 为营养盐浓度, K_v 和 K_H 分别为垂向和水平的紊动扩散系数(当 c 表示悬浮物质的浓度时, w_{sc} 为沉降速度), Q_c 为源汇项. 采用 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流封闭模式, 与紊动动能输运方程相耦合, 提供垂向混合系数.

采用交错网格上的内外模式分裂法求解, 外模式使用半隐格式, 内模式使用隐式格式. 输移方程的对流项采用中心差分格式, 或者迎风差分格式. 为较好模拟潮流的漫滩过程, 保证潮间带区域计算结果的准确性, 使用质量守恒格式处理干湿网格^[5,16].

模型计算区域包括珠江口水域, 上至深圳机场断面(OP1), 下至香港大澳潮位站断面(OP2), 右侧至乐安排潮位站断面(OP3), 深圳河延伸至离河口 16 km 的三岔口上游非感潮河段(BC). 模型计算域面积为 1 450 km², 采用曲线正交网格离散, 共 4 730 个计算网格. 深圳湾的网格较密, 平均空间步长约为 190 m, 模型在垂向均分 5 层, 模型网格图及验证站点见图 2.

在水动力模型方面, 在 OP1、OP2 和 OP3 三条开边界设置潮位边界条件, 在深圳河上游设置流量边界条件. 水动力模型验证包括潮位、流速、流向以及盐度同步实测资料验证, 潮位验证点有 5 个: S1、S2、S4、S7 和 S8; 流速和流向验证点有 3 个: S3、S5 和 S6; 盐度验证点 S6. 文献[7]有详细的水动力模型

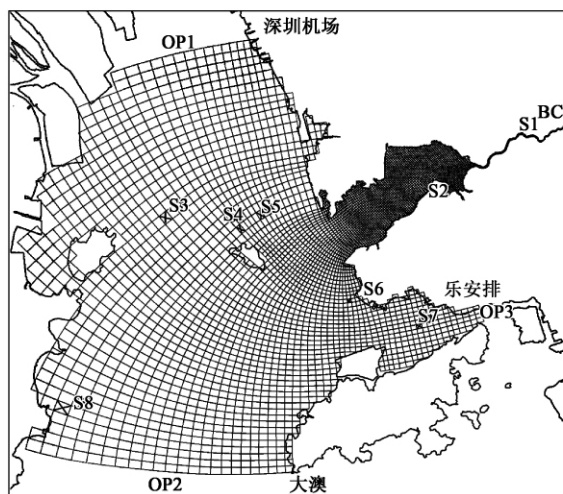


图2 模型计算网格及验证站点

Fig. 2 Computational grids and verification sites

验证结果:潮位验证点的模拟结果与实测数据吻合很好,高低潮位平均绝对误差为 0.15 m,相位误差在 1 h 之内,验证点 S1 误差较大,最大误差为 0.30 m,这是由于该点位于深圳河边界 8 km 处,而该边界采用日平均流量代替实际流量引起的;流速和流向验证方面,最大流速平均误差为 0.15 m/s,相对误差 15.2%,流向误差在 18° 以内;盐度计算值的变化趋势和实测值基本一致,在 15 ~ 25 PSU 之间波动,平均相对误差为 12.4%,模型总体上很好地反映模拟区域内的水动力状况.在水动力计算的基础上,进行 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的计算,计算时各边界给定实测条件;计算时考虑降解作用和不降解作用 2 种情况.

2 结果与讨论

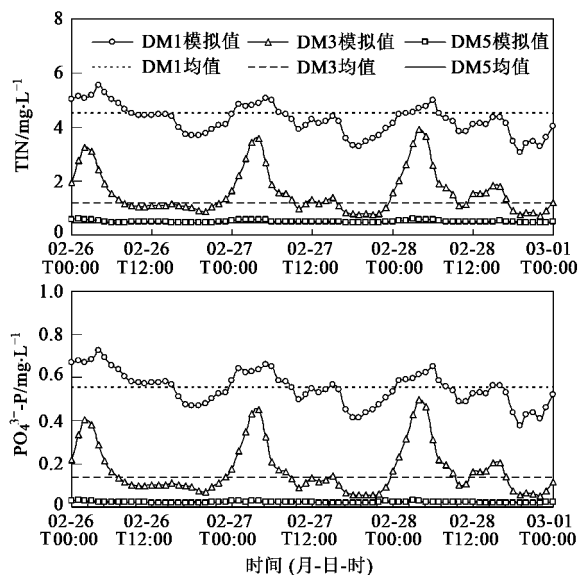
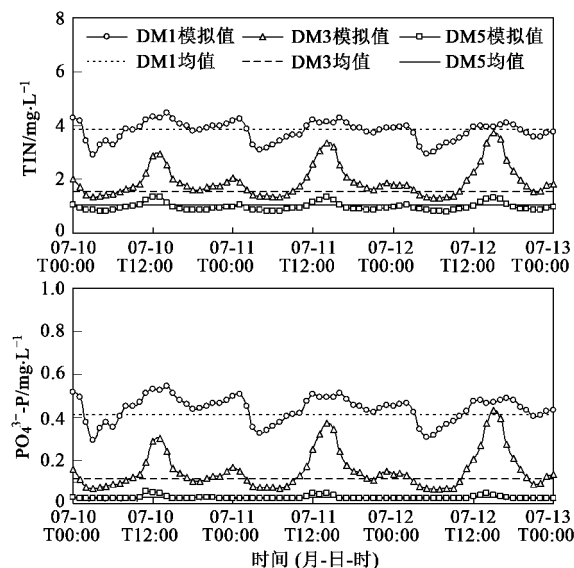
2.1 计算结果与分析

2007 年为平水年,选用 2007 年水文条件对计算域内 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 随流运输进行模拟,模拟结果代表一般平水年情况.枯、丰水期计算的时间长度均为 70 d,忽略前 10 d 计算冷启动时间,后 60 d 为枯、丰水期计算结果,分别选取 2 月和 7 月代表枯水期和丰水期.

内陆河流在枯、丰水期进入深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 日平均通量作为输入条件,该通量根据流域和河口实测水质资料推算^[7],深圳河枯、丰水期 TIN 日通量分别为 15.5 t 和 19.5 t, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别为 2.1 t 和 2.6 t. 由于缺少同步连续实测水质资料,计算中采用香港环保署 20 a 实测资料^[8] 月均值进行

对比,深圳湾采样点位置见图 1. TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 实测数据每月 1 次,为消除采样时偶然因素,如不同潮位时水质差异较大,采样前如遇较大降雨,会有大量污染物质从内陆河流冲刷进入深圳湾,因此,采用月均值可较好表征枯水和丰水期的水质状态.

深圳湾水深很浅, TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 垂向分层不明显,用垂向均值表示空间分布.图 3 和 4 分别是枯、丰水期的代表时段内 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在 DM1、DM3 和 DM5 点不考虑降解作用时随时间变化过程. 计算结

图3 枯水期的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的模拟结果和多年平均值比较Fig. 3 Comparison of the simulated and monthly-averaged measured TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in dry seasons图4 丰水期的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的模拟结果和多年平均值比较Fig. 4 Comparison of the simulated and monthly-averaged measured TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in wet seasons

果显示, TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的计算值在实测月均值上下浮动, 随时间变化规律和潮位过程基本相反, 潮位升高时, 湾外大量低浓度海水涌入湾内, 湾内海水被稀释浓度下降; 潮位降低时, 湾内水量减少, 污染负荷

不断输入情况下湾内浓度增大. 图 5 为 2007 年 2 月和 7 月计算结果的均值与相应月份实测均值比较, 其中显示, 模拟值与实测值吻合较好, 计算结果合理可靠, 基本反映湾内 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的变化规律.

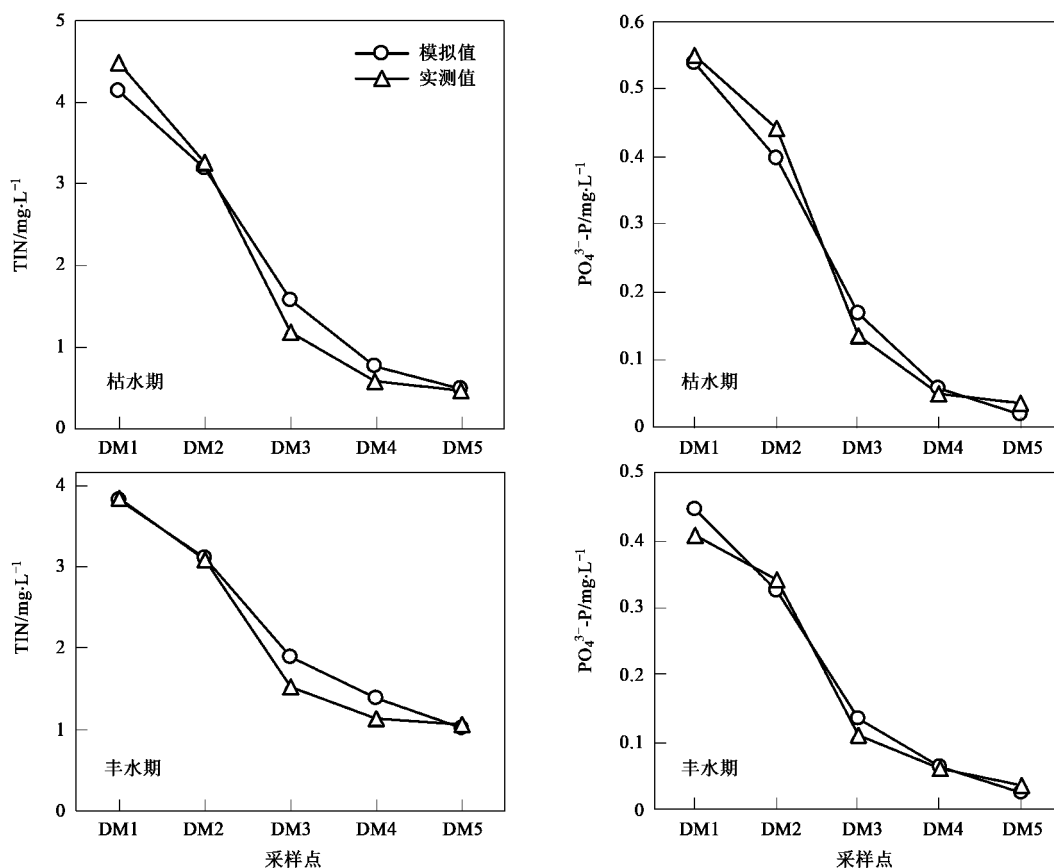


图 5 枯水、丰水期 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 计算月均值与实测值比较

Fig. 5 Comparison of the simulated and measured monthly-averaged TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in dry and wet seasons

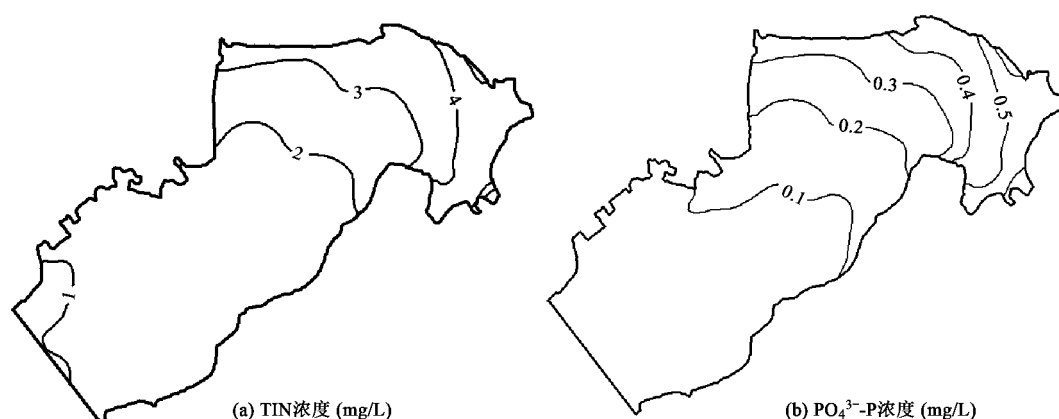
图 6 为 2007 年 2 月 27 日中潮平均潮位 (表征枯水期) 时 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在湾内分布的计算结果, 呈现由内湾至湾口不断减小的分布规律, 全湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均值分别为 1.362 mg/L 和 0.142 mg/L. 计算结果表明, 枯水期深圳湾的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 基本上都劣于四类海水水质标准.

图 7 为 2007 年 7 月 11 日中潮平均潮位 (表征丰水期) 时 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在湾内分布的计算结果, 呈现的分布规律和枯水期类似, 全湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均值分别为 1.672 和 0.122 mg/L, 总体上丰水期 TIN 比枯水期高, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 比枯水期略低.

比较枯、丰水期计算结果, 内湾的丰水期 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 较枯水期低, 湾口的 TIN 丰水期较枯水期高, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 差异不大. 这是因为: ① 内湾的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 主要受内陆河流水质控制, 内陆河流 TIN 和

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度是珠江口的 10 倍以上, 枯水期排放浓度更高, 但丰水期河流平均流量约为枯水期 3 倍, 虽然丰水期稀释作用更强, 丰水期的面源污染负荷更大, 由内陆河流携带进入深圳湾的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的量比枯水期多, 所以内湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 枯水期高、中部则丰水期更高; ② 湾口 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 受珠江口和内陆河流的共同影响, 且珠江口的影响占主导地位, 珠江口丰水期 TIN 比枯水期高, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则差异不大, 故丰水期湾口 TIN 较枯水期高, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 无明显差异.

不同潮位时湾内 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度差异较大, 按高潮位、平均潮位和低潮位统计湾内所有网格计算结果, 包括最大值、平均值和最小值, 如图 8 所示. 无论枯水期还是丰水期, 最大值一般发生在深圳河口, 基本代表内陆河流排入湾内负荷; 最小值一般发生在邻珠江口的湾口, 基本可代表珠江口影响湾

图6 枯水期 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在湾内的分布Fig. 6 TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ distributions in Deep Bay in dry season图7 丰水期 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在湾内的分布Fig. 7 TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ distribution in Deep Bay in wet season

内浓度的本底值,平均值表示残留在湾内的污染物总量.图8显示,无论 TIN 还是 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,枯水期内陆河流排入的浓度高于丰水期;珠江口枯水期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 本底浓度较小,丰水期 TIN 本底浓度是枯水期的 2 倍;湾内丰水期 TIN 均值比枯水期高 23%,说明虽然丰水期排入浓度较低,但由于丰水期流量大,所以排入 TIN 负荷高于枯水期.从潮过程看,低潮位时 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度最高,平均潮位时次之,高潮位时最低.

2.2 污染物减排效果分析

从 2.1 节的结果分析,深圳湾的水质主要受内陆河流污染物排放和珠江口本底浓度影响.以 2007 年平水年的水文条件为基础,针对污染现状,设计如下 3 个方案来分析 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的减排效果.

①为考察珠江口对深圳湾的影响,珠江口的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 保持现状水平,设计内陆河流 TIN 和

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 零排放(也即减排 100%)的算例.

②TIN 减排方案:假设珠江口 TIN 达三类标准条件,深圳湾各内陆河流的 TIN 分别减排 50%、75%、83%、90% 和 95%.

③ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 减排方案:珠江口 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 保持现状水平,深圳湾内陆河流的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 分别减排 50%、75%、83%、90% 和 95%.

上述方案均分为枯水期和丰水期 2 种水文条件来讨论.由 2.1 节可知,不同潮位时深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度差异较大,减排方案在不同潮位(高、低潮位和平均潮位)时湾内达标区域的面积占深圳湾总面积之比的统计结果见表 1 和 2.

珠江口的本底浓度对深圳湾的影响很大,假定内陆河流 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 零排放(也即减排 100%,方案①),由于枯水期珠江口 TIN 现状本底浓度基本为三至四类水,因此有 30% 左右的水域达标;丰水

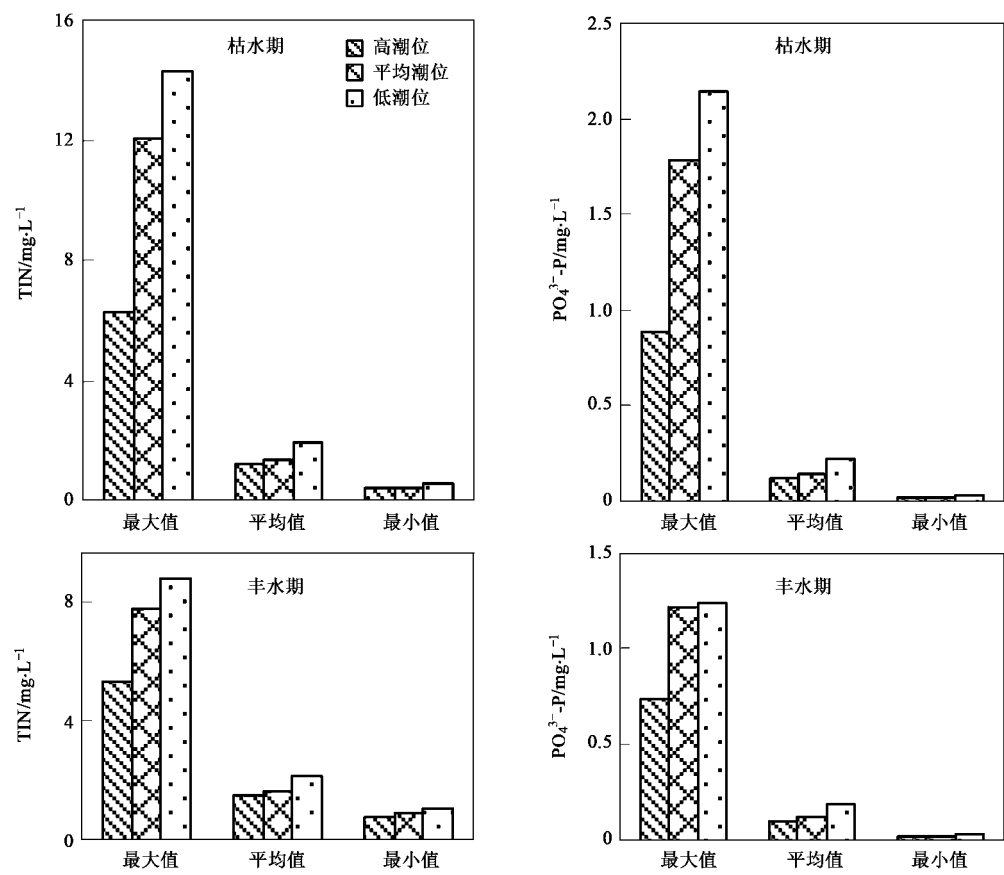


图 8 枯水、丰水期 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 在不同潮位时的比较

Fig. 8 Comparison of TIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at different water elevations in dry and wet seasons

表 1 方案①达标水域面积的百分比/%

Table 1 Ratio of the area complying with the water quality standard in case ①/%

指标	海水水质标准 (三类) /mg·L ⁻¹	枯水期				丰水期			
		本底值 /mg·L ⁻¹	低潮位	平均潮位	高潮位	本底值 /mg·L ⁻¹	低潮位	平均潮位	高潮位
TIN	0.4	0.3 ~ 0.5	55.9	31.4	26.9	0.6 ~ 1.5	1.5	0.1	0
PO ₄ ³⁻ -P	0.03	0.01 ~ 0.02	100	100	100	0.01 ~ 0.02	100	100	100

表 2 方案②和③达标水域面积的百分比/%

Table 2 Ratio of the area complying with the water quality standard in case ② and ③/%

指标	季节	潮位	减排 50%	减排 75%	减排 83%	减排 90%	减排 95%
TIN 方案②	枯水期	低潮位	0.9	4.1	9.1	24.8	52.9
		平均潮位	15.0	26.8	36.2	49.9	76.4
		高潮位	20.7	33.7	45.6	57.8	81.5
	丰水期	低潮位	1.5	9.1	22.3	38.9	100
		平均潮位	15.7	35.1	48.0	64.9	100
		高潮位	28.1	45.8	57.3	73.5	100
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 方案③	枯水期	低潮位	3.2	8.7	17.7	32.4	54.4
		平均潮位	23.6	35.6	43.1	56.8	79.1
		高潮位	29.6	45.1	54.4	64.5	82.8
	丰水期	低潮位	2.6	10.7	22.0	35.7	65.4
		平均潮位	18.1	36.0	47.6	61.3	87.0
		高潮位	30.0	47.0	57.0	70.8	90.8

期珠江口 TIN 现状是劣四类水体,即使减排 100% 时,深圳湾全部水体都达不到水体功能区划的要求,枯、丰水期全湾 TIN 均值分别为 0.425 mg/L 和 0.885 mg/L. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 由于珠江口本底浓度较小(二类水体),深圳湾内陆河流减排 100% 时,水质全部达标,枯、丰水期全水域均值分别为 0.015 mg/L 和 0.016 mg/L. 因此现状条件下,如果珠江口上游不采取减排措施,使珠江口 TIN 降低,深圳湾 TIN 根本无法达到水体功能区划的要求.

那么假设珠江口 TIN 达三类水体标准条件(方案②),深圳湾各内陆河流的 TIN 减排 50% 时,枯、丰水期 TIN 达水体功能区划要求的水域面积约占 15%;减排 75% 时,枯、丰水期 TIN 达标面积约占 27% 和 35% 左右;减排 83% 时, TIN 达标水域面积进一步扩大至 36% 和 48%;减排 90% 时,内湾 TIN 仍然偏高,湾中部和湾口基本上均能达标,枯、丰水期 TIN 达标水域分别约占 50% 和 65%.

珠江口 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 保持现状水平下(方案③),减排 50% 时,枯、丰水期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达标面积分别占 24% 和 18%;减排 75% 时,枯、丰水期达标面积增大至 36% 左右;减排 83% 时, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达标水域面积进一步扩大至 43% 和 48%;减排 90% 时,内湾 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 还偏高,中部和湾口基本上达标,枯、丰水期 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 达标水域分别约占 57% 和 61%.

内陆河流污染负荷减少 75% 时,深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 还远不能达到水体功能区划的要求,达标面积仅占 1/3 左右. 相同减排条件下,丰水期 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的达标水域的面积比枯水期大,说明径流量对深圳湾水质的影响是显著的. 内陆河流的入口都集中在内湾,而内湾水体交换效率十分低下^[7],致使内湾污染物很难排到外海,内湾污染带的面积较大, TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 维持在较高水平. 对于非恒定流水域(如河口、海湾等)水质达标标准,国家规范并没有定量指标来评价,本研究采用以下标准:平均潮位时达标面积为 75% 以上,以及最低潮位(污染最严重时刻)达标面积达到 50% 以上. 按上述标准,深圳湾只有减排 95% 时,湾内 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 基本达到水体功能区划的要求.

3 讨论

上述减排方案没有考虑 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的降解效果,视为保守物质. 据报道^[1],深圳河湾总氮(TN)和总磷(TP)的降解都符合一级降解规律,降解速率

分别为 0.05 d^{-1} 和 0.001 d^{-1} . 考虑降解时 TIN 整体降低,枯水期全湾平均值为 0.90 mg/L,不考虑降解时平均值为 1.36 mg/L. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的降解速率相对很小,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度影响不明显.

如果考虑降解效果,重新计算方案,计算结果表明,减排 75% 时,枯水期 TIN 达标水域的面积占 61.08%,减排 83% 时占 75.01%,因此,减排 83% 时 TIN 基本能达到水体功能区划的要求.

根据 1998 年香港环境保护署对香港近海污染基线的调查报告^[9],深圳湾底质中营养盐类指标的调查结果表明:凯式氮含量为 339 mg/kg, TP 含量为 245 mg/kg,其中 TP 含量比其它海域高,这主要是由于内陆含磷污染物经深圳河及新界西北其它河流带到深圳湾沉淀、积聚的结果. 底质中营养盐的释放会加剧深圳湾水体的污染. 由于深圳湾溶解氧指标一般情况(除个别情况下,如暴雨后短时间的暴雨径流冲击溶解氧很低)都比较高,好氧条件下底质中营养盐释放基本维持在较低的水平. 如果考虑底质的影响,对计算结果影响较小,而且和降解作用有一定抵消作用.

进入深圳湾的氮、磷来源主要来自 3 个方面:陆源污水、深圳湾流域的面源污染、深圳河底质释放. 内陆河流进入深圳湾的营养盐总量可通过河口营养盐的实测浓度来控制,由此推算,进入深圳湾的 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的总通量分别为 8 552.67 t/a 和 1 137.46 t/a^[7]. 因此,该通量数据实际上已包括这 3 方面的污染来源. 氮、磷总量的削减包括所有这些来源的削减. 深圳市政府最近几年大规模截污、建污水厂来减少污水中氮、磷的排放,预计 2013 年,85% 以上污水进入污水厂;2009 年,深港两地政府联合启动治理深圳河底泥释放策略研究以及流域的治理等措施来控制底泥释放和面源营养盐进入深圳湾. 以上工程完成后,将大大消减进入深圳湾的污染负荷.

4 结论

(1) 采用 EFDC 模型建立深圳湾三维水动力和营养盐模型,模拟 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等主要营养盐在深圳湾 2007 年枯、丰水期的输运规律. 计算结果在实测月均值上下浮动,随时间变化规律和潮位过程基本相反,潮位升高时,湾外大量海水涌入湾内,湾内海水被稀释浓度下降,潮位下降时,湾内浓度升高; TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的计算值和实测多年月均值空间分布吻合较好.

(2) 计算表明,枯水期深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的

均值分别为 1.362 mg/L 和 0.142 mg/L, 丰水期分别为 1.672 mg/L 和 0.122 mg/L, 基本属劣四类海水水质; 丰水期 TIN 比枯水期高, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 则相反.

(3) 内陆河流 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 减排方案的计算表明, 珠江口 TIN 提高至三类海水标准是深圳湾水体达标的前提; 在珠江口三类水质条件下, 不考虑降解作用, 减排 95% 以上时深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 基本达到三类海水水质标准功能区划的要求; 考虑降解作用, 减排 83% 以上时深圳湾可达到水体功能区划的要求.

参考文献:

- [1] 深圳市水污染治理指挥部办公室. 深圳河湾水系水质改善策略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 1-20.
- [2] 香港特别行政区环境保护署. 香港海水水质报告 [R]. 2008. 1-50.
- [3] 戴纪翠, 高晓薇, 倪晋仁, 等. 深圳近海海域营养现状分析与富营养化水平评价 [J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2879-2883.
- [4] 曹磊. 黄河兰州段水污染物规划环境容量和排污总量控制研究 [J]. 环境科学, 1993, 14(1): 54-58.
- [5] 张利民, 刘洋, 孙卫红, 等. 太湖流域漕桥河小流域水环境容量估算及污染物削减分配 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 502-508.
- [6] Skogen M D, Mathisen L R. Long-term effects of reduced nutrient inputs to the North Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82: 433-442.
- [7] Boyacioglu H, Alpaslan M N. Total maximum daily load (TMDL) based sustainable basin growth and management strategy [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 146: 411-421.
- [8] Boesch D F. Challenges and opportunities for science in reducing nutrient over-enrichment of coastal ecosystems [J]. Estuaries, 2002, 25(4b): 886-900.
- [9] Whitall D, Castro M, Driscoll C. Evaluation of management strategies for reducing nitrogen loadings to four US estuaries [J]. Science of the Total Environment, 2004, 333: 25-36.
- [10] 胡嘉东, 秦华鹏. 深圳河湾水系生态需水的污水资源化 [J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 20-23.
- [11] 刘宁, 吕锐锋. 深圳河湾水污染水环境治理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. 1-30.
- [12] Lee J H W, Qu B. Hydrodynamic tracking of the massive spring 1998 red tide in Hong Kong [J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2004, 130(5): 535-550.
- [13] 栗苏文, 李红艳, 夏建新. 基于 Delft 3D 模型的大鹏湾水环境容量分析 [J]. 环境科学研究, 2005, 18(5): 91-95.
- [14] Hamrick J M. A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects [R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report 317, 1992. 1-22.
- [15] Tetra Tech, Inc. The environmental fluid dynamics code, user manual, US EPA version 1.01 [R]. California: 2007. 1-10.
- [16] Tetra Tech, Inc. The environmental fluid dynamics code, theory and computation, volume 1: Hydrodynamic and mass transport [R]. California: 2007. 1-10.
- [17] 万由鹏. 深圳湾水动力时间参数计算及主要营养盐减排效果分析 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [18] <http://www.epd.gov.hk/epd/cindex.html>.
- [19] 香港特别行政区政府环境保护署. 香港海洋污染基线调查报告 [R]. 2000. 30-80.