

钦州湾物理自净能力研究

A Study on Physical Self-purification of the Qinzhou Bay

夏华永

殷忠斌

葛文标

Xia Huayong

Yin Zhongbin

Ge Wenbiao

(广西海洋监测预报中心
北海市四川路 536000)(广西海洋研究所 北海
市南珠东路 536000)(Guangxi Ocean Observation and Forecast Center,
Sichuan Road, Beihai, Guangxi, 536000)(Guangxi Institute of Oceanology,
East Nanzhu Road, Beihai, Guangxi, 536000)

摘要 采用二维潮流数值模型和水质模型探讨了钦州湾污染物的扩散规律,利用钦州湾海域现场观测数据,计算了钦州湾的海水交换率,平均半更换期及环境容量。计算结果表明,在较大潮汐时,钦州湾的海水交换率为 0.124,平均半更换期为 7.2 个潮周期,保持一级海水的 COD 排放量为每个潮周期 234.5 t,保持二级海水的 COD 排放量为 366.9 t。

关键词 数值模型 污染物扩散 海水交换率 半更换期 环境容量

Abstract The rules of pollutant transportation of the Qinzhou Bay were discussed by making use of two-dimensional tidal current model and water quality model. Based on the marine investigation data, the turn-over rate, half exchange period and environmental capacity were computed. The results show that under bigger tide the turn-over rate of the Qinzhou bay is 0.124, half exchange period is 7.2 tidal periods, the permitted discharge of COD for first-class sea water is 234.5 t per tidal period and that for second-class is 366.9 t per period.

Key words numerical model, pollutant transportation, sea water turn-over rate, half exchange period, environmental capacity

钦州湾位于北部湾顶部,广西沿岸中段,其位置为 $108^{\circ}28'20''\sim 108^{\circ}45'30''$ E, $21^{\circ}33'20''\sim 22^{\circ}00'$ N。该湾由内湾(茅尾海)和外湾两部分构成,中间狭窄,两端开阔,东、西、北三面为陆地所环绕,南面与北部湾相通,是一个半封闭型天然河口海湾。湾口宽度为 29 km,纵深 39 km,海湾岸线总长 336 km,面积为 380 km^2 。钦州湾岸线曲折,水文和地质条件良好,具有天然港址之称,现在已开发了龙门港、企沙港和犀牛脚港,已经成为大西南的主要出海口之一。

港口的发展也带动了港口工业和经济的繁荣,同时,也不可避免地增加了对港湾的环境污染,为了在发展港口经济的同时保护好生态环境,研究钦州湾的海水自净能力为海域的管理提供依据,具有重要的意义。本文利用水流数学模型、水质模型和文献

(广西钦州地区钦州康熙岭围地域海河堤整治与农业开发工程环境影响预可行性研究报告,广西海洋研究所,1992。)中的潮汐盐度资料对钦州湾的污染物扩散规律、海水交换率和环境容量做了初步的探讨。

1 钦州湾流场模拟

潮流和余流是钦州湾污染物扩散的主要动力因素,为了探讨污染物的扩散规律和海水交换率,就必须对潮流做一个准确的模拟。

1.1 基本方程及差分格式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} - fv + g \frac{u(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C_{sh}} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + fu + g \frac{v(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C_s h} = 0 \quad (3)$$

式中, z 为水位, h 为水深, u v 分别为向东和北向深度平均的水平流速分量, C_s 为谢才系数, f 为柯氏力系数

边界条件为

岸边界 $Vn = 0$, n 为岸边界外法线方向;

水边界 给出水位值 Z 或流速值

模型的计算采用隐式方向交替法 (ADI法)

1.2 计算结果分析

计算中水边界由企沙站和三娘湾站的潮汐资料 (1991年 6月 27日 6点~ 6月 28日 14点) 插值而得, 在茅岭江和钦江入口处, 由于水位资料缺乏, 在计算过程中假定茅岭江和钦江为一个恒定的流量, 并采用在 6月份的多年平均流量, 其值分别为 $74.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $66.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 计算时间步长为 60 s , 空间步长为 750 m , 计算域剖分见图 1

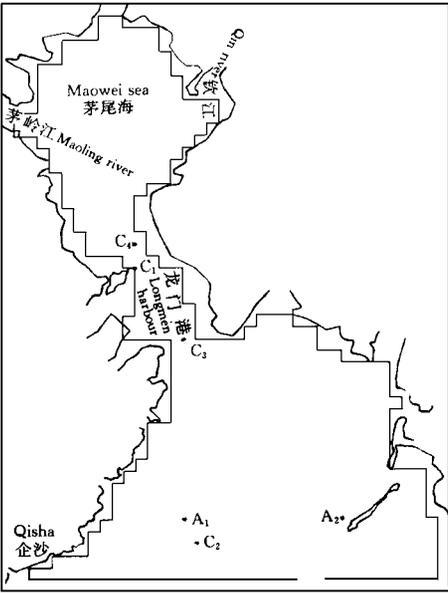
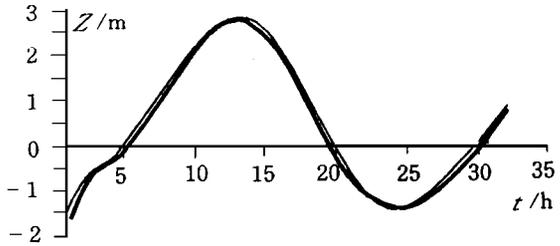


图 1 钦州湾计算域

Fig. 1 Computed area of the Qinzhou Bay



—— 实测 Measuring —— 计算 Calculating

图 2 龙门站潮位过程线

Fig. 2 Time history of tidal elevation at Longmen tidal station

在龙门站有可供验证的潮汐资料, 图 2 是实测值和计算值的对照图, 从图 2 可知, 计算值和实测值基本相符, 最大偏差为 19 cm , 这是因龙门处于钦州湾的咽喉处, 附近岛屿众多, 对岸线模化及地形处理较难所致

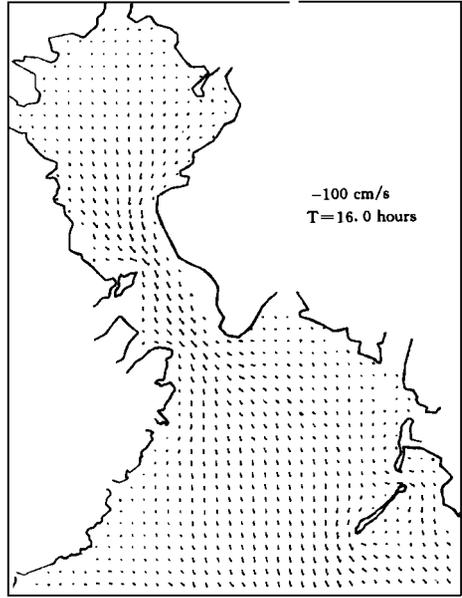


图 3 涨潮最急流场

Fig. 3 The swiftest flood velocity fields

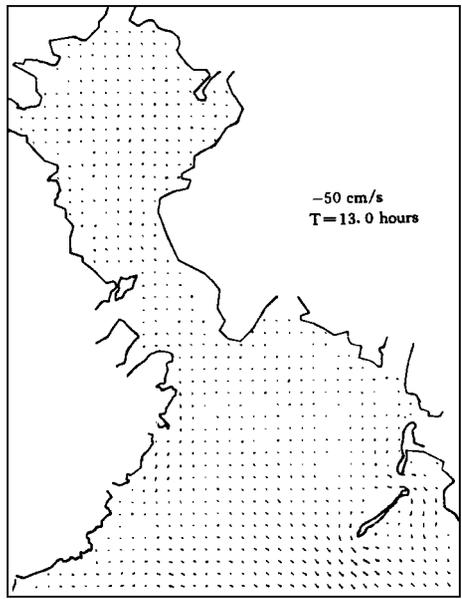


图 4 高潮流场

Fig. 4 High tidal velocity fields

图 3, 4, 5, 6 是流场模拟结果, 模拟表明, 在涨潮过程中, 外海潮波传入钦州湾, 流向都指向口门, 因为钦州湾形似一个喇叭口, 在潮波传播过程中, 波能辐聚, 所以流速越来越大, 到了咽喉段流速达到最大, 过了咽喉段后, 潮流进入宽广的茅尾海, 由于水深变浅, 水流阻力增大, 流速逐渐减小, 但在刚

出龙门的三叉口东侧的深槽,流速有所增大,例如在涨急流场中(图3),口门C₂点(图1)的流速为0.46 m/s,咽喉段C₃点的流速为0.77 m/s, C₁点的流速为0.78 m/s, C₄点的流速为1.16 m/s。无论在外湾还是内湾,潮流都受岸线和深槽的影响,流向有顺着深槽的趋势。在外湾西侧航道附近海域的流速较东侧海域的流速大。在高潮时(图4),由于钦州湾是一个狭长海湾,当咽喉段处于高潮时,口门处开始落潮,而在茅尾海则仍在涨潮,不过流速都较小。落潮是涨潮的逆过程,流场情况类似(图5)。在低潮时,

茅尾海水深较小,较大面积的滩涂露出,其低潮较口门滞后近2h。这些模拟情况与钦州湾的长期水文观测结果相符。

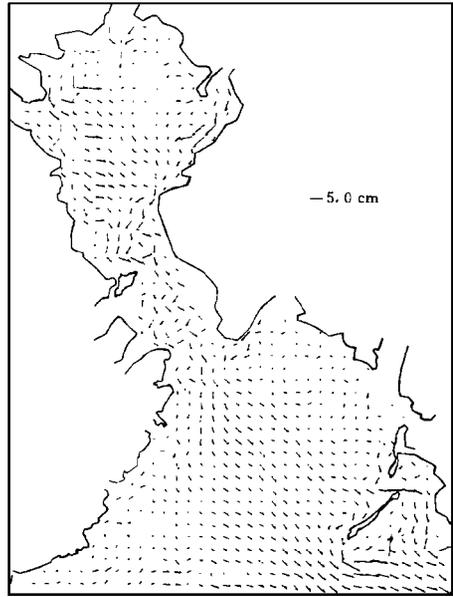


图7 余流流场

Fig. 7 Residual velocity fields

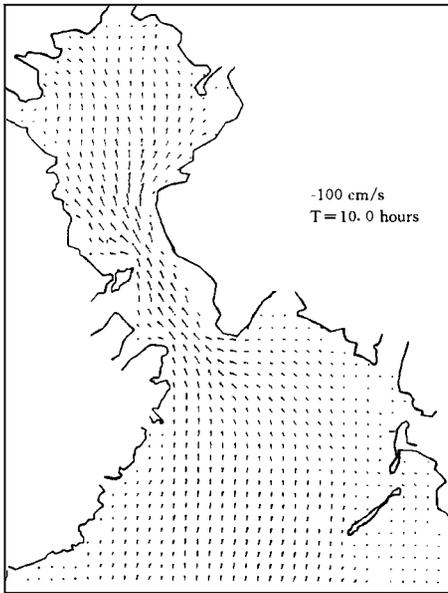


图5 落潮最急流场

Fig. 5 The swiftest ebb velocity fields

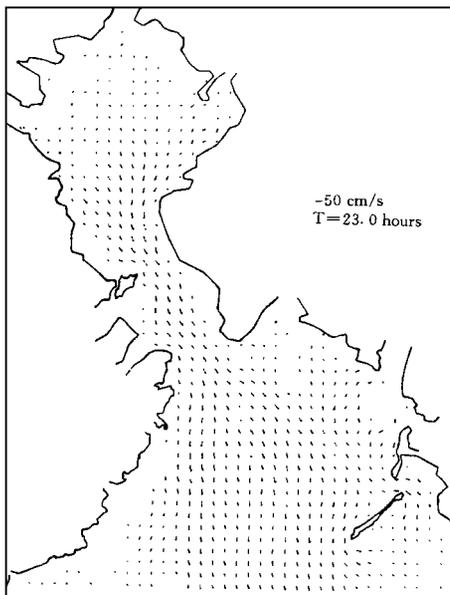


图6 低潮流场

Fig. 6 Low tidal velocity fields

1.3 余流流场

余流在估量海湾中物质的长期输运以及海湾的海水交换等方面有较大的实用价值。引起余流的原因较多,因底摩擦、底形、边界形状引起的潮流非线性现象、径流、波浪、密度梯度都可引起余流。在钦州湾的余流计算中,只考虑了潮流的非线性现象及径流因素。

余流的计算公式为

$$\bar{u} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k u(i), \quad (4)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^k v(i), \quad (5)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{\bar{u}}{\bar{v}}. \quad (6)$$

\bar{u} , \bar{v} 和 θ 分别为余流的东向分量、北向分量及流向, K 为一个潮周期内的步长个数。

余流的模拟结果如图7所示。在大多数计算点上,余流流速不大于3 cm/s, 一般都在1~2 cm/s之间, 只有在个别点流速超过5 cm/s。由于径流作用, 在茅尾海的东侧潮沟与西侧潮沟, 余流都沿着顺岸的深槽朝湾外流动; 在钦州湾外湾, 余流的基本流向是朝湾外流动, 在口门处余流还有往东侧流动的趋势; 在咽喉段内, 余流较为复杂, 由于地形影响, 还有旋

涡产生,但总趋势还是向外湾流动。余流流场的特点有利于污染物的扩散和湾内海水与湾外海水的交换。

2 污染物扩散模拟

为了认识污染物在钦州湾内的迁移和扩散规律,主要污染源对纳污水域的水质影响,在潮流模拟的基础上,采用兰德水质模型对扩散过程进行了模拟

2.1 扩散模型及计算方法

钦州湾为浅水海湾,主要污染源是钦江和茅岭江的径流,污染物随径流进入海湾前在垂向已充分混合,对于充分混合的海区可用二维单层质量平衡方程

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(hD_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hD_y \frac{\partial c}{\partial y}) + R. \quad (7)$$

式中, c 为垂向平均浓度; R 为源汇项; D_x D_y 分别为 X 方向和 Y 方向的弥散系数

$$D_x = 5.93 \overline{|g|} |u| h / C_s, \quad (8)$$

$$D_y = 5.93 \overline{|g|} |v| h / C_s. \quad (9)$$

边界条件

流出边界,

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} = 0. \quad (10)$$

流入边界,

$$C = 0.$$

岸边界,

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0.$$

扩散方程的计算采用幂函数方案的控制体积法^[5],浓度场布置在水位点上,用逐行法做迭代计算,直到收敛为止。

2.2 污染源强度

由于缺乏与水力模拟同步的污染源强度资料,源强采用钦州市水文总站统计的 1993 年钦江和茅岭江的 COD 年平均入海通量,钦江的 COD 入海通量是 4 243.04 t/a,茅岭江的 COD 入海通量是 4 892.4 t/a 其它污染源有沿岸工业废水、城镇居民生活污水及船舶排污,但其分布零散,不是主要污染源,且缺乏详细的分布资料,所以在模型中不予考虑

2.3 浓度场分析

经过 11 个潮周期的计算之后,浓度场趋于稳定,结果如图 8, 9 浓度场有以下特点:在高潮时浓度梯

度(图 8)比低潮时浓度梯度(图 9)小;在涨潮过程中,深槽处流速大,浓度较周边海域的浓度小,落潮过程中正好相反;无论是高潮还是低潮,茅尾海内的浓度梯度比外湾的浓度梯度大得多;在低潮时茅尾海部分区已经露出,从茅岭江和钦江排出的污染物只能沿着顺岸深槽流出,污染物难以扩散,因此,在深槽附近浓度梯度很大



图 8 高潮 COD 浓度场 (mg/L)

Fig. 8 High tidal concentration fields of COD

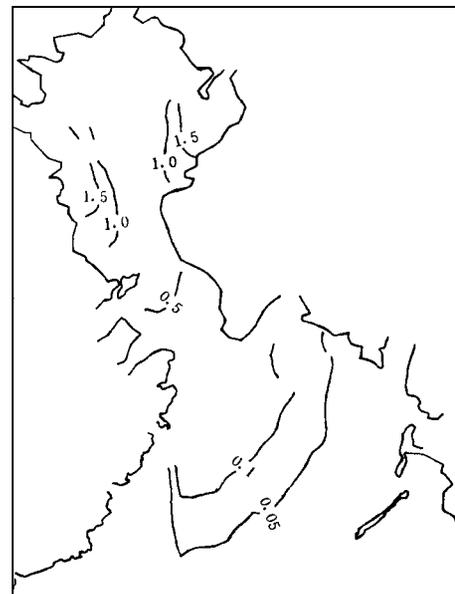


图 9 低潮 COD 浓度场 (mg/L)

Fig. 9 Low tidal concentration fields of COD

3 钦州湾的环境容量估算

3.1 钦州湾的海水交换率

3.1.1 海水交换率公式^[1]

(a) 柏井法是把 Parker^[2]的海水交换率扩展,提

出外海水与湾内水直接交换, 其交换率定义为

$$V_G = \frac{C_F - C_E}{C_O - C_B} = \frac{V_E \cdot V_F}{V_E + V_F - V_E \cdot V_F} \quad (11)$$

式中, C_O 为外海水平均浓度; C_B 为湾内水平均浓度; C_E 为落潮时流出水的平均浓度; C_F 为涨潮流入水的平均浓度; V_E 为涨潮流入量中流入湾内的浓度 C_O 的外海水所占的比率; V_F 为落潮流出量中流出湾外的浓度为 C_B 的湾内水所占的比率 V_E 和 V_F 的计算公式为

$$V_E = \frac{C_F - C_E}{C_O - C_E} \quad (12)$$

$$V_F = \frac{C_F - C_E}{C_F - C_B} \quad (13)$$

(b) 中村武弘法是根据 Parker 和柏井的提法, 提出湾内水对湾外海水的交换率和外海水对湾内水的交换率分别为

$$V = \frac{V_F(1 - T(1 - V_E))}{V_E + V_F - V_E \cdot V_F} \quad (14)$$

$$U = \frac{V_E(1 - T(1 - V_F))}{V_E + V_F - V_E \cdot V_F} \quad (15)$$

式中, $a = Q_F / Q_E$, Q_F 为涨潮流入湾内的水量, Q_E 为落潮流出的湾内水量

3.1.2 计算结果

在计算海水交换率时, 选用盐度做为指标物质, 盐度资料与潮流模拟所采用的水文资料是同步的 (广西钦州地区钦州康熙岭围地地域海河堤整治与农业开发工程环境影响预可行性研究报告, 广西海洋研究所, 1992)。由于盐度测站布置在湾口的东航道口门和西航道口门 (图 1 中的 A1 A2 点), 因而以 A1 A2 两点的连线做为湾内与湾外海域的分界线。A1 A2 两处的盐度周日变化见图 10, 分界面上其它点的盐度由插值而得, 由大面站和连续站所测得的资料得出: C_O 为 29.01‰, C_B 为 19.22‰。

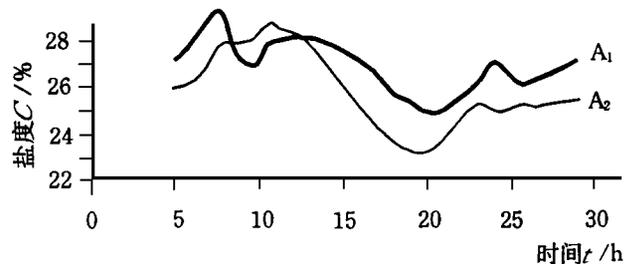


图 10 盐度周日变化图

Fig. 10 Periodic variation of salinity

平均浓度 C_{Fi} 和落潮平均浓度 C_{Ei} , 再根据式 (12), (13) 计算每个小区间的海水交换率 V_{Fi} 和 V_{Ei} , 整个断面的交换率由式 (16), (17) 求出。

$$V_E = \sum_i Q_{Fi} V_{Ei} \sum_i Q_{Fi} \quad (16)$$

$$V_F = \sum_i Q_{Ei} V_{Fi} \sum_i Q_{Ei} \quad (17)$$

在此基础上, 求出 V_G V_U , 经计算得 V_E 为 0.318, V_F 为 0.169, V_G 为 0.124, V 为 0.125, U 为 0.127

3.2 钦州湾的半更换期^[3]

半更换期是指湾内海水更新一半所需的时间, 是衡量海域自净能力的重要因子, 海湾的平均半更换期可由水质模型求出, 港湾的零维水质预测模型^[4]为

$$V \frac{dC_B}{dt} = U Q_F C_O - V Q_E C_B + D \quad (18)$$

式中, V 为湾内平均海平面下水体体积; T 为潮周期数; D 为一个潮周期内所有污染源向湾内的排放总量。

求解方程 (18), 得到水质预测公式

$$C_B = \{C'_B - \frac{1}{V Q_E} (U Q_F C_O + D)\} \exp(-\frac{\gamma Q_E T}{V}) + \frac{1}{V Q_E} (U Q_F C_O + D) \quad (19)$$

式中, C'_B 为指标物质的初始浓度

在计算钦州湾的半更换期时, 假定指标物质排放总量为零, 指标物质的平均浓度 C_O 为零, 那么式 19 简化为

$$C_B = C'_B \exp(-\frac{\gamma Q_E T}{V}) \quad (20)$$

当 $C_B = C'_B / 2$ 时,

$$T_{1/2} = 0.693 V / \gamma Q_E$$

钦州湾内海水体积为 $1.3687 \times 10^9 \text{ m}^3$, 落潮量为 $1.053 \times 10^9 \text{ m}^3$, γ 取 0.125, 得出 $T_{1/2}$ 为 7.2 个潮周期

3.3 环境容量估算

环境容量指水域对污染物的自净能力, 是对海湾流入污染物质负荷量的限制目标, 下面以 COD 估算环境容量。

当海湾内 COD 的平均浓度在每一个潮周期内都保护不变时, $\frac{dC_B}{dt} = 0$, 那么由方程 (18) 可知, 污染物的最大允许排放量可表示为

$$D = V Q_E C_B - U Q_F C_O \quad (21)$$

在潮流模拟中得知, $Q_E = 1.053 \times 10^9 \text{ m}^3$, $Q_F =$

1. $0.489 \times 10^9 \text{ m}^3$, 钦州湾湾外的 COD 年平均浓度为 1.22 mg/L , 经式 (21) 计算出钦州湾保持 1 级和 2 级海水水质时, 在一个潮周期内 COD 最大排放量分别为 234.5 t 和 366.9 t

4 讨论

钦州湾是一个浅水海湾, 湾口宽阔, 又受径流影响, 其余流有利于污染物的扩散和海水交换, 在大潮情况下, 其交换率为 0.124, 半更换期为 7.2 个潮周期, 钦州湾的自净能力是很强的。

半更换期 7.2 个潮周期是整个湾内的平均值, 对于各个局部海域的半更换期是不一样的, 在污染物扩散模拟中, 茅尾海的 COD 浓度梯度比外湾的浓度梯度大得多, 因此, 茅尾海的半更换期应比外湾大得多。

钦州湾的咽喉段对茅尾海内的污染物扩散起了一个阻碍作用, 以致茅尾海的 COD 浓度很大, 在茅尾海内排放的污染物对水质有较长时间的影响, 因此, 污染物应尽量避免排放在茅尾海内。又因涨潮过程中, 钦州湾的 COD 浓度梯度较小, 所以污染物最好在涨潮过程中排放。

在大潮时一个潮周期内钦州湾保持一级海水的 COD 最大容量为 234.5 t , 保持二级海水的最大容量

为 366.9 t , 这个结果是就整个海域而言的, 如果在局部海域排放过多, 那么局部海域的水质不能保持在规定的标准内, 特别是在茅尾海内, 若排放量过多, 会引起较大海域的水质恶化。

由于资料缺乏, 本工作的结果只是较大潮位时的情况, 因而不能完全代表钦州湾的物理自净能力, 当小潮时情况会有所变化。如果钦州湾在潮差为全年平均潮差 2.4 m 时的海水交换率仍为 0.124, 由式 (21) 计算, 钦州湾的环境容量约减小 40%。

参考文献

- 1 匡国瑞. 海湾水交换的研究: 海水交换率的计算方法. 海洋环境科学, 1986, 5 (3).
- 2 Parker D S P Norris, Nelson A W. Tidal exchange at Golden Gate, Proc of ASCE, 1972, 98(SA2), 305~323.
- 3 潘伟然. 湄州湾海水交换率和半更换期的计算. 厦门大学学报, 1992.
- 4 匡国瑞等. 海湾水交换的研究: 乳山东湾环境容量初步探讨. 1987, 6 (1).
- 5 S V 帕坦卡, 传热与流体流动的数值计算. 北京: 科学出版社, 1984.

(责任编辑: 蒋汉明 邓大玉)