

# 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律

方神光, 崔丽琴

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

**摘要:**为探讨珠江河口磨刀门水道盐水入侵规律,采用同步实测的方法对磨刀门水道上至竹银下至口门近半月的水文和盐度进行了测量。结果表明,磨刀门水道盐度总体呈现向上游递减的趋势;口门位置表、底层平均盐度在不同潮型和涨落潮下相差较大,变化范围在1.7%~2.4%之间,尤以枯季分层明显,通常落潮期表、底层盐度差异比涨潮期大;上游竹银位置不同潮型下的表、底层盐度相差较小,平均涨落潮盐度都在0.1%以内;从磨刀门水道沿程表、底层盐度相差比例统计来看,大、中、小潮期间底层平均盐度比表层分别大43.1%、53.4%和77.4%,且流速和盐度的垂向分布存在较好的对应关系,因此小潮期间,更容易出现异重流现象。近口门河段盐度随水深减小而直线递减,上游河段则呈指数递减规律;大潮时,两种分布规律的分界位置距口门23 km左右,中潮和小潮时距口门17 km左右。

**关键词:**咸潮入侵;盐度;涨潮;落潮;磨刀门水道

**中图分类号:**TV148<sup>+</sup>.4;X145

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2015)04-0014-05

**Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway//**FANG Shengguang, CUI Liqin (Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** For obtaining the rules of seawater intrusion in the Modaomen Waterway of the Pearl River Estuary, almost half a month, the hydrology and salinity were synchronously measured at the river section from Zhuyin down to Koumen. The results show that the salinity in the Modaomen Waterway generally presents a decreasing trend from downstream to upstream. In Koumen, the average salinity in surface water and at bottom, under different tides and flood-ebb fluctuation, has a large difference with a variation range between 1.7% and 2.4%, whose layering is clearer in dry seasons. Additionally, the difference in ebb period is typically larger than tide rising period. However, in Zhuyin, the salinity in surface water and at bottom, under different tides, has a small difference, with the average salinity lower than 0.1% under flood-ebb fluctuation. From the perspective of ratio statistics of differences between surface and bottom salinities along the Modaomen Waterway, the average salinity at bottom is 43.1%, 53.4%, and 77.4% higher than that in surface water in spring, middle, and neap tides, respectively. Furthermore, there exists better corresponding relations between velocities and salinities along water depth, so it is easier for the emergence of gravity flow during the neap tide. Closely to Koumen, salinity linearly decreases with the decrease of water depth; in upstream, salinity demonstrates the index declining rule. In addition, termination points of the two distribution rules are respectively about 23 km under spring tide and 17 km under middle and neap tides far from Koumen.

**Key words:** Seawater intrusion; salinity; tide rising; ebb; Modaomen Waterway

珠江八大口门中,以磨刀门输水输沙量最大,其上游磨刀门水道从西江干流百顷头至灯笼山河段,全长约44 km。该水道年径流量占珠江入海总径流量的28.3%,但年内分布不均,主要集中在每年的汛期(4—9月)<sup>[1]</sup>。枯水季节,随着上游径流量的大幅度减少,周边城镇的供水安全经常受到咸潮灾害的威胁。珠江河口咸潮活动规律可分为潮优型(主要为虎门)和径控型(主要为崖门、虎跳门、鸡啼门、

磨刀门、横门、洪奇门和蕉门)<sup>[2-3]</sup>,潮优型盐淡水混合主要表现为垂向均匀,径控型主要表现为高度分层。谭超等<sup>[4]</sup>研究表明,洪季磨刀门河口由于径流占显著优势,洪水成为拦门沙演变的主要动力,水体分层明显,表现为浮力射流;贾良文等<sup>[5]</sup>对枯季实测资料分析显示,枯季磨刀门水道潮流以潮动力为主,存在明显的因盐度入侵而形成的密度环流;应秩甫等<sup>[6]</sup>分析指出,不论是洪季还是枯季,伶仃洋水

域东、西航道都出现显著盐水分层或异重流现象。针对近年来磨刀门水道咸潮灾害加剧的原因,韩志远等<sup>[7]</sup>认为近年河道采砂和河口围垦导致口门“调淡”作用丧失是主要因素;诸裕良等<sup>[8]</sup>则提出了一种简单有效的盐水入侵预测模式,并分析了磨刀门水道增大压咸流量的最佳时机。盐水入侵不仅直接影响两岸城市和工农业取水水质,且因影响水体理化性质,间接影响沿线生态环境。邱耀文等<sup>[9]</sup>指出气体在水中的溶解度与盐度负相关,在河口地区,海流带来的低温、高盐和低溶解氧的水团与河水混合,使向河口方向水中的溶解氧含量逐渐降低;曹玉鹏等<sup>[10]</sup>试验分析了福建可门港海相淤泥和江苏白马湖湖相疏浚淤泥的沉积规律,显示淡水环境下泥浆的沉降量大于盐水环境下的沉降量;Chen 等<sup>[11]</sup>研究磨刀门水道盐水入侵时发现,珠江口浑浊度和有色可溶性有机物浓度存在线性相关性,浑浊度大,总悬浮物量大的水体对有机物有强大的吸附力;陈祖军<sup>[12]</sup>分析显示长江口枯水期水源地咸潮入侵与其发生首日的大通水文站前 6 日日径流量相关性相对较好,并就抑制咸潮入侵提出了相关建议。

为探讨磨刀门水道近些年来咸潮的活动特性,珠江水利科学研究院于 2009 年 12 月 10—25 日对磨刀门水道至上至竹银、下至磨刀门口门之间近 40 km 的磨刀门水道中的 8 个站点(图 1)表、底层盐度进行了同步逐时测量,其中 1 号测点位于磨刀门口门位置,距大

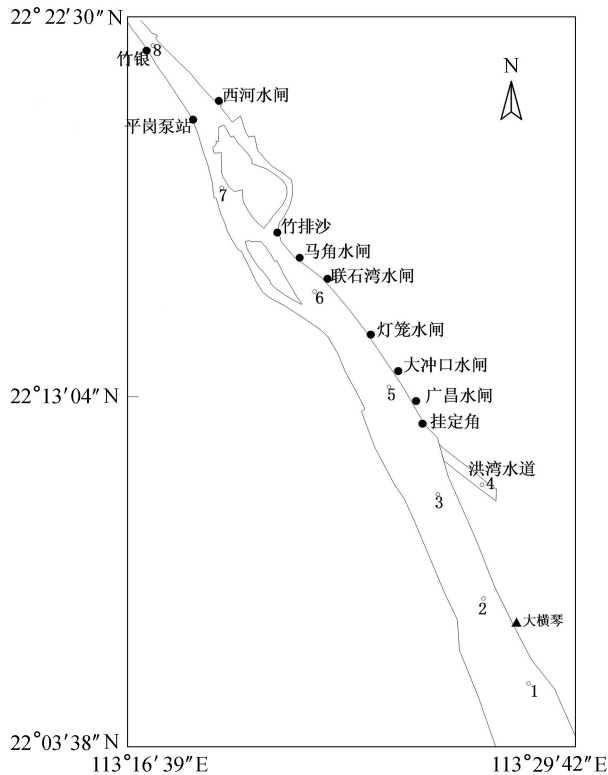


图 1 磨刀门水道测点分布

横琴水文站以南约 3.8 km, 8 号站点位于竹银, 4 号站点布置在洪湾水道内。本文依据实测表、中、底层盐度数据对该水道的枯季盐度入侵特性进行分析和探讨。

## 1 磨刀门水道盐度沿程分布特性

统计磨刀门水道不同潮型特征盐度情况如图 2 和图 3 所示,其中横坐标  $x$  是距口门 1 号测点的距离,向上游方向为正。

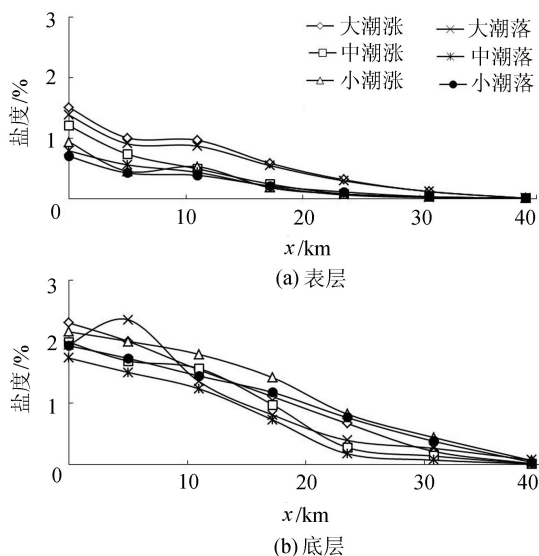


图 2 磨刀门水道枯季涨落潮平均盐度

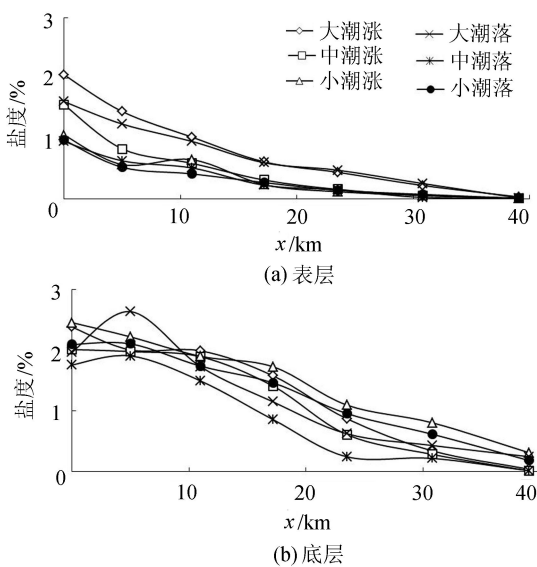


图 3 磨刀门水道枯季涨落潮最大盐度

a. 各潮型表、底层盐度总体呈向上游递减的趋势;其中口门位置表、底层平均盐度在不同潮型下均相差较大,差距在 1.7% ~ 2.4% 之间;上游竹银位置不同潮型下的表、底层盐度相差较小,涨落潮平均盐度都在 0.1% 以内。

b. 表层盐度基本随潮差增大而增大,底层盐度大体随潮差增大而减小,即小潮时的底层平均盐度反而要大于大潮和中潮,且小潮期间涨潮的盐度要大于落潮。

c. 从表、底层盐度相对差统计来看,小潮期间表、底层盐度差别大于大潮和中潮,大、中、小潮期间底层平均盐度分别比表层大 43.1%、53.4% 和 77.4%,可见小潮期间更容易形成盐楔或异重流现象。

d. 最大盐度分布与变化规律与平均盐度一致;但从竹银段 8 号测点实测资料来看,尽管该位置表、底层涨落潮平均盐度值都小于 0.1%,且表层最大实测盐度值也都小于 0.1%,但部分时段内底层盐度仍达到 0.3137% 和 0.2483%,可见即使在该位

置,底层盐度入侵的现象也相当明显。

## 2 磨刀门水道盐度垂向分布特性

图 4~7 给出了磨刀门水道 1 号和 8 号测点大小潮期间流速和盐度垂向分布。其中流速以流向外海为正。

### 2.1 口门盐度垂向分布特性

a. 大潮时,涨急和落急时的流速分布分别呈正、反“S”形,表层流速显著大于底层;涨憩和落憩

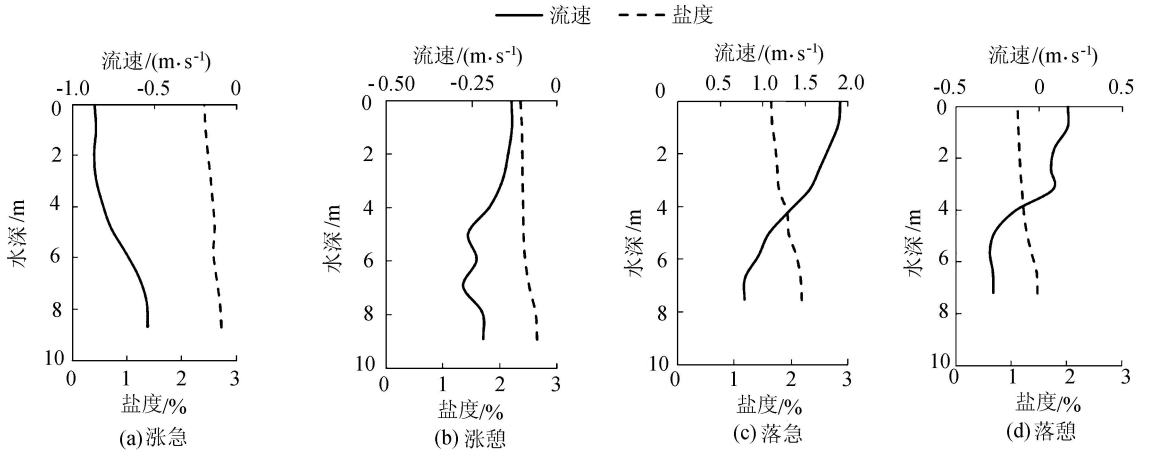


图 4 1 号测点大潮期间流速与盐度垂向分布

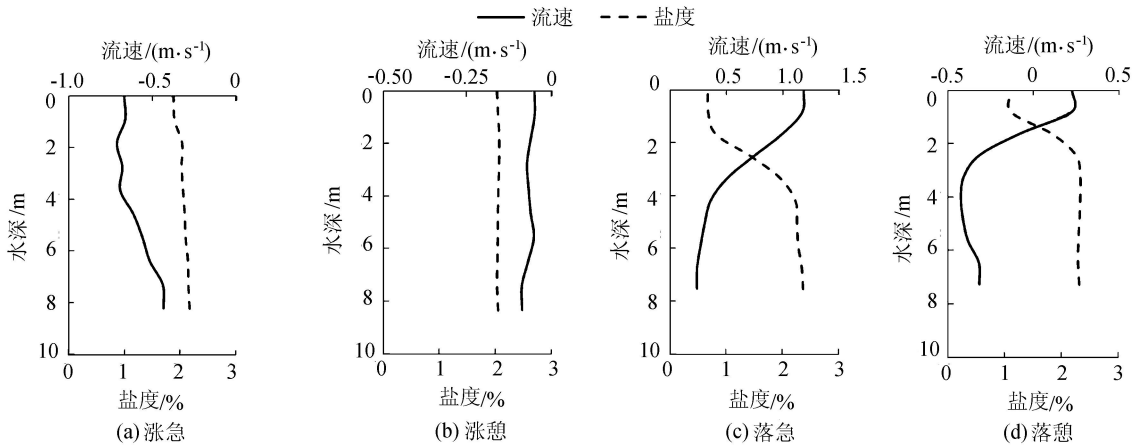


图 5 1 号测点小潮期间流速与盐度垂向分布

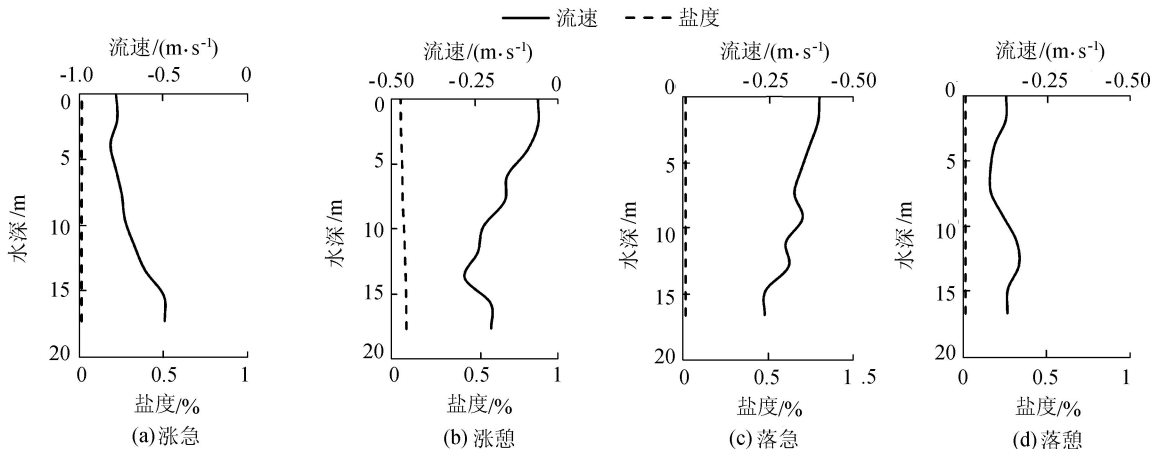


图 6 8 号测点大潮期间流速与盐度垂向分布

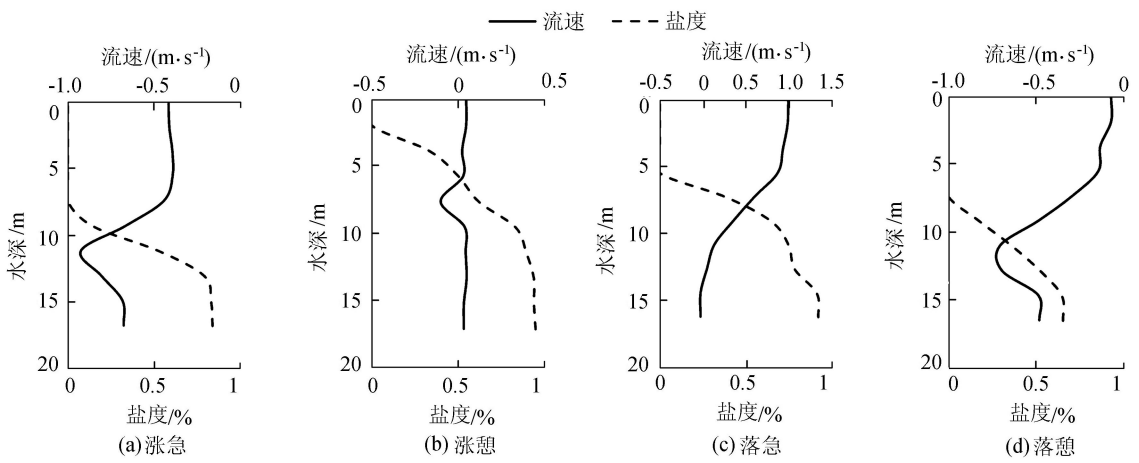


图7 8号测点小潮期间流速与盐度垂向分布

时,流速很小,涨憩时流速垂向分布为中间层大于表层,落憩时则呈反“S”形,表、底层流速大,中间流速小,且表、底层流向相反;盐度近似倾斜直线分布,底层盐度略大于表层,落潮期间表底层盐度差别略大于涨潮;盐度与流速分布之间呈现一定的对应关系,且落潮期间最为明显;流速与盐度变化线的拐点都在4 m水深附近。

**b.** 小潮时,涨急和落急时的流速分布仍呈正反“S”形,表层流速显著大于底层;涨憩和落憩流速都很小,涨憩时流速呈垂直线分布,落憩时流速呈“凸”形,表、底层流速相反,中间层流速大于表、底层;小潮期间,口门位置涨急和涨憩时的盐度都近似直线分布,表底层盐度差别很小,盐度垂向分布较为均匀;落潮期盐度垂向呈现明显的“S”形,表层盐度显著小于底层;落潮期盐度分布与流速分布存在显著对应关系,且流速与盐度变化线的拐点在水深2.0 m左右位置。

## 2.2 水道上游盐度垂向分布特性

8号测点位于本次现场测量的上游端,由于距离口门较远,受径流影响较大,流速和盐度沿垂向变化规律较口门处有所不同。

**a.** 大潮时,涨急和落急时的流速总体近似直线分布,表层流速大于底层;涨憩和落憩时,流速较小,涨憩时底层流速大于表层,落憩时流速垂向方向变化不大;盐度总体较小,除涨憩段有明显盐度外,其他阶段盐度都接近零。

**b.** 小潮时,径流作用进一步凸显,涨急时刻,水深0~7.5 m范围流速变化不大,7.5~12 m范围流速迅速增加到最大值,从12 m至河床底部流速迅速减小,该现象显然是由于涨潮期间盐水楔由底部向上游迅速上溯形成;落急时,流速垂向分布仍呈“S”形,表层显著大于底层。

**c.** 小潮期间,淡水层与盐水层具有明显的界

限。涨急、落急和落憩时刻,淡水层和盐水层在的分界大致在水面以下水深6.0 m左右,涨憩时刻分界显著上移到水深2.5 m左右。涨急、落急和涨憩时刻,在淡水层与盐水层的分界处流速垂向分布有明显拐点,与盐度分布具有较好的对应关系;涨憩时,流速垂向变化很小,显示径流与潮汐作用力接近平衡,咸淡水混合最充分,含盐层厚度也达到最大。

从本次枯季磨刀门水道实测表、底层盐度资料分析可见,磨刀门水道表层盐度显著小于底层盐度,小潮期间该现象最为明显;小潮期间的底层盐度要大于大潮和中潮,形成明显的盐水分层现象,显示磨刀门水道枯季小潮期间的盐水入侵更为严重;表层盐度变化规律仍基本遵循随潮型增大而增大的规律。该现象与刘杰斌等<sup>[13]</sup>根据2008—2009年丰水年枯季和2007—2008年枯水年枯季磨刀门水道表层实测盐度资料分析得到的规律基本一致。

## 3 磨刀门水道盐度变化规律

图8给出了沿程表、底层平均盐度实测值的拟合线,表、底层在大、中、小潮时的拟合公式分别为

$$S/S_s = \begin{cases} -0.0347x + 1 & x \leq 23 \text{ km} \\ 28.624e^{-0.2001x} & x > 23 \text{ km} \end{cases} \quad (1)$$

$$S/S_s = \begin{cases} -0.0473x + 1 & x \leq 17 \text{ km} \\ 1.5596e^{-0.1222x} & x > 17 \text{ km} \end{cases} \quad (2)$$

$$S/S_s = \begin{cases} -0.0455x + 1 & x \leq 17 \text{ km} \\ 2.0537e^{-0.1225x} & x > 17 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

$$S/S_b = \begin{cases} -0.0315x + 1 & x \leq 23 \text{ km} \\ 9.9e^{-0.1552x} & x > 23 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

$$S/S_b = \begin{cases} -0.029x + 1 & x \leq 17 \text{ km} \\ 10.026e^{-0.1791x} & x > 17 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

$$S/S_b = \begin{cases} -0.0205x + 1 & x \leq 17 \text{ km} \\ 9.4704e^{-0.1411x} & x > 17 \text{ km} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S$ 为磨刀门水道上游表层或底层位置的盐度;

表 1 磨刀门水道各测点表底层盐度差值

测点	距离/km	表底层盐度差值/%		
		大潮	中潮	小潮
1	0	0.681	0.863	1.224
2	5.0	1.221	0.942	1.423
3	11.0	0.524	0.930	1.156
5	17.2	0.388	0.625	1.093
6	23.5	0.223	0.154	0.695
7	30.8	0.119	0.079	0.378

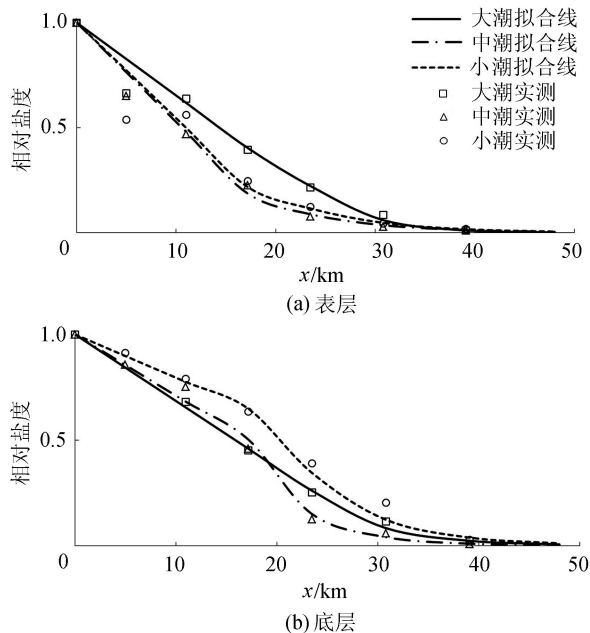


图 8 磨刀门水道枯季表层和底层盐度拟合线

$S_s$ 、 $S_b$  分别为表层和底层盐度； $S/S_s$  和  $S/S_b$  为相对盐度。其中式(1)(2)(3)分别为大、中、小潮时的磨刀门水道表层盐度拟合公式，式(4)(5)(6)分别为大、中、小潮时磨刀门水道底层盐度拟合公式。

a. 磨刀门水道表、底层平均盐度分布规律可采用两段曲线进行拟合，近口门河段可采用直线拟合，上游段可采用指数曲线拟合；大潮时，两种分布规律的分界位置距口门 23 km 左右(6 号测点，联石湾水闸附近)，中潮和小潮时，该分界位置距口门 17 km 左右(5 号测点，大冲口水闸附近)。

b. 中潮和小潮时的表层盐度分布曲线相当接近，且在距口门 30 km(7 号测点)范围内，表层盐度明显小于大潮时的表层盐度，上游各潮型的平均盐度差别不大，枯季磨刀门水道的盐度影响范围主要集中在近口门 30 km 范围的水域。

c. 大、中、小潮下近口门的盐度沿程变化斜率分别是 -0.0315、-0.029 和 -0.0205，可见小潮时底层盐度向上游方向减小得最为缓慢；盐度呈指数变化时，大、中、小潮下的指数分别是 -0.1552、-0.1791 和 -0.1411，同样可见小潮时底层盐度沿程衰减最为缓慢；潮汐对底层盐度的影响范围在口门上游约 40 km 以内，明显比表层影响范围大。

d. 表 1 给出了各测点位置表底层盐度的差值(底层盐度减去表层盐度)，可见，表底层最大盐度差值位置出现在 2 号测点(横琴水文站)附近，且潮汐越小，表底层盐度差值越大，越容易形成盐水楔或盐水异重流现象。

根据拟合公式可预测磨刀门水道上游各位置表、底层的平均盐度。但从 1 号至 3 号测点 10 km

左右范围内表层盐度拟合线与实际值差别较大，该河段正好位于磨刀门水道与洪湾水道汇合口至口门区间，相对汇合口上游河段来看，该区段邻近外海，受潮汐作用明显，同时岛屿和浅滩众多，表层水体同时受磨刀门水道和洪湾水道下泄淡水影响，流态和盐度变化复杂，应用时需要进行修正。

## 4 结 论

a. 磨刀门水道水体表底层盐度总体呈现依次向上游递减的规律；其中口门位置表、底层平均盐度在不同潮型和涨落潮下相差较大，变化范围在 1.7%~2.4% 之间，上游竹银位置不同潮型下的表、底层盐度相差较小，平均涨落潮盐度都在 0.1% 以内。

b. 磨刀门口门位置涨落潮期间的流速垂向总体呈“S”形分布，流速与盐度分布存在较好的对应关系，且大潮和小潮期间流速与盐度垂向变化的拐点分别在水深 4.0 m 和 2.0 m 左右；磨刀门上游竹银位置大潮期间盐度垂向方向都接近于 0；小潮期间存在显著的淡水和盐水分层现象，盐水层位于淡水层底部，分界线一般在水深 6.0 m 左右变化，涨憩时刻盐水层厚度显著增大，分界线能达到水深 2.5 m 左右。

c. 磨刀门水道表、底层平均盐度分布规律可采用直线和指数曲线进行较好拟合，近口门位置河段盐度可采用直线拟合，即盐度分布规律呈现直线递减趋势，上游段可采用指数曲线拟合，即上游段盐度呈现指数递减规律；大潮时，两种规律的分界位置在联石湾水闸附近，中潮和小潮时，分界位置在大冲口水闸附近。

## 参考文献：

- [1] 金腊华,徐峰俊. 河口及近海水质模拟[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] 欧素英. 珠江三角洲咸潮活动的空间差异性分析[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 89-92. (OU Suying. Spatial difference about activity of saline water intrusion in the Pearl (Zhujiang) River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(1): 89-92. (in Chinese))

(下转第 23 页)

of Lanzhou University: Natural Sciences, 2014, 50 (3): 299-304. (in Chinese))

[12] 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报, 2013, 33 (5): 1559-1568. (LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1559-1568. (in Chinese))

[13] 吕新, 王双明, 杨泽元, 等. 神府东胜矿区煤炭开采对水资源的影响机制: 以窟野河流域为例[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42 (2): 54-61. (LÜ Xin, WANG Shuangming, YANG Zeyuan, et al. Influence of coal mining on water resources: a case study in Kuye River Basin [J]. Coal

Geology & Exploration, 2014, 42(2): 54-61. (in Chinese))

[14] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[15] 苏凤阁, 谢正辉. 气候变化对中国径流影响评估模型研究[J]. 自然科学学报, 2003, 13 (5): 502-507. (SU Fengge, XIE Zhenghui. Study on evaluation model for impacts of climatic changes on the runoff in China [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13 (5): 502-507. (in Chinese))

[16] 焦恩泽. 窟野河水沙变化趋势初步分析[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 1-57.

(收稿日期: 2014-08-24 编辑: 熊水斌)

(上接第 18 页)

[3] 徐锋俊, 朱士康, 王华. 伶仃洋水动力环境分析及治理策略探讨[J]. 人民珠江, 2004 (1): 11-14. (XU Fengjun, ZHU Shikang, WANG Hua. Analysis of hydrodynamic environment of Lingdingyang Bay and improvement strategy [J]. Pearl River, 2004 (1): 11-14. (in Chinese))

[4] 谭超, 黄本胜, 龚文平, 等. 珠江磨刀门河口排洪动力特征及拦门沙演变响应的初步研究[J]. 水利学报, 2013, 44 (9): 1023-1029. (TAN Chao, HUANG Bensheng, GONG Wenping, et al. The dynamics of flood releasing and its effects on the morphological evolution of the mouth bar in the Modaomen Estuary of the Pearl River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (9): 1023-1029. (in Chinese))

[5] 贾良文, 吴超羽, 任杰, 等. 珠江口磨刀门枯季水文特征及河口动力过程[J]. 水科学进展, 2006, 17 (1): 82-88. (JIA Liangwen, WU Chaoyu, REN Jie, et al. Hydrologic characteristics and estuarine dynamic process during the dry season in Modaomen Estuary of the Pearl River [J]. Advances in Water Sciences, 2006, 17 (1): 82-88. (in Chinese))

[6] 应秩甫, 陈世光. 珠江口伶仃洋咸淡水混合特征[J]. 海洋学报, 1983, 5 (1): 1-10. (YING Zhifu, CHEN Shiguang. Mixing characteristics of saline and fresh water in Lingdingyang Bay of the Pearl River [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1983, 5(1): 1-10. (in Chinese))

[7] 韩志远, 田向平, 刘峰. 珠江磨刀门水道咸潮上溯加剧的原因[J]. 海洋学研究, 2010, 28 (2): 52-59. (HANG Zhiyuan, TIAN Xiangping, LIU Feng. Study on the causes of intensified saline water intrusion into Modaomen Estuary of the Zhujiang River in recent years [J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(2): 52-59. (in Chinese))

[8] 诸裕良, 闫晓璐, 林晓瑜. 珠江口盐水入侵预测模式研

究[J]. 水利学报, 2013, 44 (9): 1009-1014. (ZHU Yuliang, YAN Xiaolu, LIN Xiaoyu. Study on prediction model of saline intrusion in Pearl River Delta [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (9): 1009-1014. (in Chinese))

[9] 邱耀文, 王肇鼎. 珠江口伶仃洋水域溶解氧特征[J]. 热带海洋, 1994, 13 (2): 99-102. (QIU Yaowen, WANG Zhaoding. Characteristics of dissolved oxygen in Lingdingyang waters Zhujiang River Estuary [J]. Tropic Oceanology, 1994, 13(2): 99-102. (in Chinese))

[10] 曹玉鹏, 吉锋. 吹填淤泥沉积规律室内试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (3): 36-39. (CAO Yupeng, JI Fen. Model tests on sedimentation behavior of dredged sludge [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (3): 36-39. (in Chinese))

[11] CHEN S S, FANG L G, ZHANG L X, et al. Remote sensing of turbidity in seawater intrusion reaches of Pearl River Estuary: a case study in Modaomen water way, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 82: 119-127.

[12] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源地盐水入侵规律及其应对措施[J]. 水资源保护, 2014, 30 (3): 19-24. (CHEN Zujun. Saltwater intrusion into water source zone in Yangtze Estuary in post-Three Gorges engineering era and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3): 19-24. (in Chinese))

[13] 刘杰斌, 包芸, 黄宇铭. 丰、枯水年磨刀门水道盐水上溯运动规律对比[J]. 力学学报, 2010, 42 (6): 1098-1103. (LIU Jiebin, HUANG Yuming, Sun Yuming. Contrast of movement law of saline intrusion in Modaomen waterway in the wet year and the dry year [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42 (6): 1098-1103. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-06-23 编辑: 郑孝宇)