

# 2000—2005 年莱州湾盐度的变化 及其主要影响因素\*

赵 鹏<sup>1</sup> 江文胜<sup>1①</sup> 毛新燕<sup>1</sup> 高会旺<sup>2</sup> 郭新宇<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛 266100;  
3. 日本爱媛大学沿岸环境科学研究中心 松山 7908577)

**提要** 基于 2000 年 8 月, 2002 年 8 月, 2004 年 9 月, 2005 年 5 月, 2005 年 7 月及 2005 年 9 月莱州湾的大面观测资料以及黄河利津站 2000—2005 年入海径流量资料, 分析了黄河入海径流对莱州湾盐度分布的影响, 通过计算莱州湾的平均盐度发现 2003 年之后莱州湾平均盐度较 2003 年之前明显降低。在考虑黄河入海径流量、降水、蒸发及与北黄海的水交换等因素的基础上建立了箱式模型, 并以此模型模拟了近年来莱州湾平均盐度的变化, 同样看到莱州湾平均盐度的显著降低已在 2003 年发生, 其主要原因是黄河入海径流量的增加。分析模型结果得出近年来黄海入海径流量的变化不仅决定着莱州湾平均盐度的年际变化, 而且还主导着莱州湾月平均盐度的变化。

**关键词** 莱州湾 盐度 黄河 径流量

**中图分类号** P731

莱州湾是我国唯一的半封闭陆架浅海——渤海的一个重要组成部分, 是山东半岛西北部的海域。它的平均水深小于 10 m, 海底较为平坦, 水深由湾顶向渤海中部逐次变深, 最深处仅为 18 m(冯士筭等, 1999)。黄河是影响本区域的主要河流, 在莱州湾的西北部入海, 每年为渤海带来了大量的淡水、泥沙以及生源物质。作为环渤海经济圈的一部分, 莱州湾沿岸经济较为发达, 而莱州湾的石油、天然气等矿藏又使得其在能源短缺的今天显示了重要性。莱州湾初级生产力较高, 是多种鱼虾繁殖产卵索饵洄游的良好场所, 因此这里一直是我国北方重要的海产品捕捞地。上述这些使得莱州湾成为一个在交通、能源、食品等领域均具有重要意义的海域, 同时由于其与陆地的邻近性, 使得它在人类生活中具有重要的作用, 因此也就更多地受到人类活动的影响。

事实上, 随着周边地区人口的增长和经济的发

展, 莱州湾的生态环境状况发生了明显的变化(赵章员等, 2000), 如近年来近岸海域污染未见缓解, 渔业资源严重衰退, 海洋生物种类减少, 溢油污染事故不断。这些是容易引起公众关注的一些显著变化, 但有一些因子的变化则不是那么直接, 比如海水的盐度, 这是海水的一个重要物理因子, 它在海洋的水团、跃层、海流等物理海洋现象中扮演了重要的角色(刘哲等, 2003)。同时它也是海洋生态系统重要的环境因子, 因为海水的盐度直接影响着海洋生物的生长、繁殖等各个过程。因此对于莱州湾盐度变化以及影响其变化因素的研究具有十分重要的理论和现实意义。

对于整个渤海盐度的时空分布, 我国学者进行了较为详细的研究, 并获得了重要成果。Lin 等(2001)、方国洪等(2002)及吴德星等(2004)利用海洋台站资料对 2000 年之前渤海盐度的长期变化进行过分析, 均指出渤海盐度呈上升趋势。Lin 等(2001)通过分

\* 国家重点基础研究发展规划项目: “中国典型河口-近海陆海相互作用及其环境效应”, 2002CB412402 号; 教育部新世纪优秀人才支持计划项目, NCET-05-0592 号; 日本综合地球环境学研究所研究项目: 1-2FR“近年黄河急剧水环境变化及其意义”, 2002—2007。赵 鹏, 博士研究生, E-mail: pentium2k@163.com

通讯作者: 江文胜, 教授, 博士生导师, E-mail: wsjang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2008-10-05, 收修改稿日期: 2009-04-14

析 1960—1997 年龙口、塘沽、秦皇岛、芷锚湾、鲅鱼圈、长兴岛等 6 个海洋观测站的资料, 得出渤海表层盐度平均每年上升 0.074(0.045—0.107), 并认为渤海盐度的变化主要取决于淡水通量(河流径流量、地下水、降水、蒸发)和与北黄海水交换的变化。方国洪等(2002)利用线性回归方法对渤海和北黄海西部沿岸 7 个海洋站 1965—1997 年实测海洋表层盐度的长期变化趋势做了分析, 得出渤海在这 32 年期间海表盐度年变率为 0.042/a, 32 年间升高 1.34。吴德星等(2004)分析 1961—1996 年间北隍城、葫芦岛、秦皇岛和塘沽 4 个海洋观测站的盐度资料, 发现这几个观测站的年平均盐度分别上升了 0.4, 1.1, 1.6 和 1.9。在分析了渤海盐度 1960 到 2000 年的变化之后, 吴德星等(2004)指出在对渤海盐度变化产生影响的各个淡水通量中, 降水量变化的贡献为 14%, 蒸发的贡献为 11%, 黄河入海流量的贡献为 75%, 其他河口入海流量的变化对渤海盐度变化的贡献不显著。

由于沿黄河工农业的发展, 使得 20 世纪 80 年代以来, 特别是进入到 90 年代, 黄河入海水量急剧减少, 不时出现黄河断流现象, 且断流日数不断增加。而整个莱州湾以及渤海地区属于多蒸发少降水地区, 渤海沿岸地区年平均日照时数一般在 2500—2900 h, 与内陆沙漠相似, 年太阳辐射总量多在 5200 MJ/m<sup>2</sup>, 是我国沿海地区太阳辐射总量高值区, 尤其是处在南部的莱州湾, 其东岸的莱州和龙口两地 1951—1980 年间的年平均降水量分别为 640.3 和 633.3 mm, 而年平均蒸发量却分别高达 2118.7 和 1904.7 mm(傅命佐等, 1994), 且近 10 几年来, 莱州湾周边区域降水量呈下降趋势。因此黄河的水量是莱州湾以至渤海的重要淡水来源, 黄河水量的减少是近年来渤海盐度升高的主要原因。

本文中作者拟利用自 2000 年开始的 6 次莱州湾盐度的观测资料, 结合黄河流量来研究黄河入海径流量对莱州湾盐度的影响, 为日后进一步探讨莱州

湾地区的海洋生态环境变化做出基础性铺垫。由于各次观测范围不尽相同, 本文所指莱州湾的范围为 118.7°—120.0°E, 37.1°—38.0°N。

## 1 莱州湾盐度资料来源

本文中所用盐度资料来自于 2002 年 8 月、2004 年 9 月、2005 年 5 月、7 月、9 月及 2000 年 8 月的莱州湾(图 1)的大面观测资料。各次观测中设置了 13—31 个站位不等, 范围基本包括整个莱州湾。在每个观测站点采用 CTD 进行盐度剖面的观测, 同时取水样用实验室盐度计(SYA2-2 型)进行校正, 具体所用仪器、观测方式等见表 1。其中 2005 年 7 月及 9 月还有表层盐度走航观测资料, 在观测时, 除了在各观测站点采用 RBR-620 水质仪取得盐度剖面外, 还利用 RBR-420 CTD 测量航程中的表层盐度值, 每 3 s 测量一次, 以船速 6 节计算, 在航线上的空间分辨率约为 9 m, 而定位则采用亚米级的差分 GPS, 通过时间将 RBR 记录的盐度数据及 GPS 中的经纬度值对应起来即可得到莱州湾高分辨率的表层温、盐资料。

## 2 莱州湾盐度分布对黄河径流变化的响应

### 2.1 莱州湾盐度垂向分布特征

将各次观测到的莱州湾各站点盐度的表底盐度差绘制成图 2, 发现在莱州湾的大部分区域盐度垂向

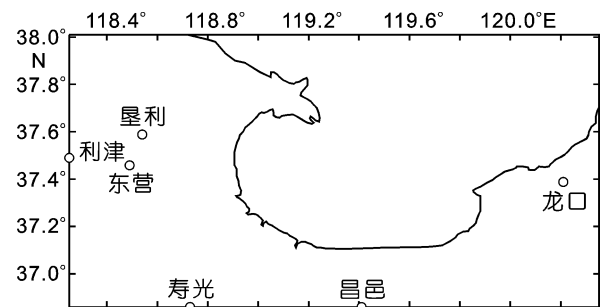


图 1 莱州湾地形图(○代表沿岸县市行政区域)

Fig.1 The topography of Laizhou Bay

表 1 2000—2005 年莱州湾盐度观测简况

Tab.1 The summary of salinity observation in the Laizhou Bay from 2000 to 2005

观测时间	观测站位数	观测方式	观测仪器
2000 年 8 月 29—30 日	31	剖面观测	Idronaut 316 CTD
2002 年 8 月 27—29 日	20	剖面观测	YSI 6600 水质仪
2004 年 9 月 15—19 日	13	剖面观测	Alec AAQ1183 水质仪
2005 年 5 月 12—16 日	13	剖面观测	RBR-620 水质仪
2005 年 7 月 8—10 日	24	走航及剖面观测	RBR-620 水质仪& RBR-420 CTD
2005 年 9 月 22—26 日	25	走航及剖面观测	RBR-620 水质仪& RBR-420 CTD

分布比较均匀,只是在河口附近盐度具有一定的垂向结构,表底盐度差别比较大,2005年9月有的近河口站点表底盐度差可达8。这主要是由于莱州湾水深较浅,潮流的作用使得海水垂向混合较充分,河流的淡水输入形成了表面的低密度水层,因此仅在河口区附近盐度垂向分布呈现了上低下高的结构。这样一来,表层盐度在很大程度上反映了莱州湾整体盐度的水平分布。另外在河口区附近更多地反映了河流影响的细节。所以以下有关莱州湾盐度的讨论更多地围绕表层进行。

2.2 莱州湾盐度水平分布特征及年际变化

图3是6次观测得到的莱州湾表层盐度水平分布图。从图中可以看出,各次观测得到的结果有明显区别。从量值上看可以发现,从2000年以来莱州湾盐度整体存在着下降的趋势,而从空间分布上看,莱州

湾盐度从2000年的分布较为均匀转变为2005年受到很强的黄河径流影响。图3a为2000年8月29—30日莱州湾海域表层盐度分布,此时莱州湾内大部分地区盐度大于31,同期观测得到的渤海海峡外的盐度值为31.6左右(吴德星等,2004)。可以看出,莱州湾与海峡外的盐度梯度远小于80年代以前。而且从图中基本看不出河口的影响,分布较为均匀,至于图中莱州湾东部盐度梯度较低的区域是由于观测期间恰逢一次台风降雨过程,盐度低的区域为台风过后观测的(江文胜等,2002),如果去掉这几个点那么盐度的表层分布将更加均匀。

图3b为2002年8月27—29日莱州湾部分区域的表层盐度分布情况,黄河第一次调水调沙利津站受到影响的时段是2002年7月6—21日(郑玉成等,2006),在这期间大量黄河水输入莱州湾。图3b的盐

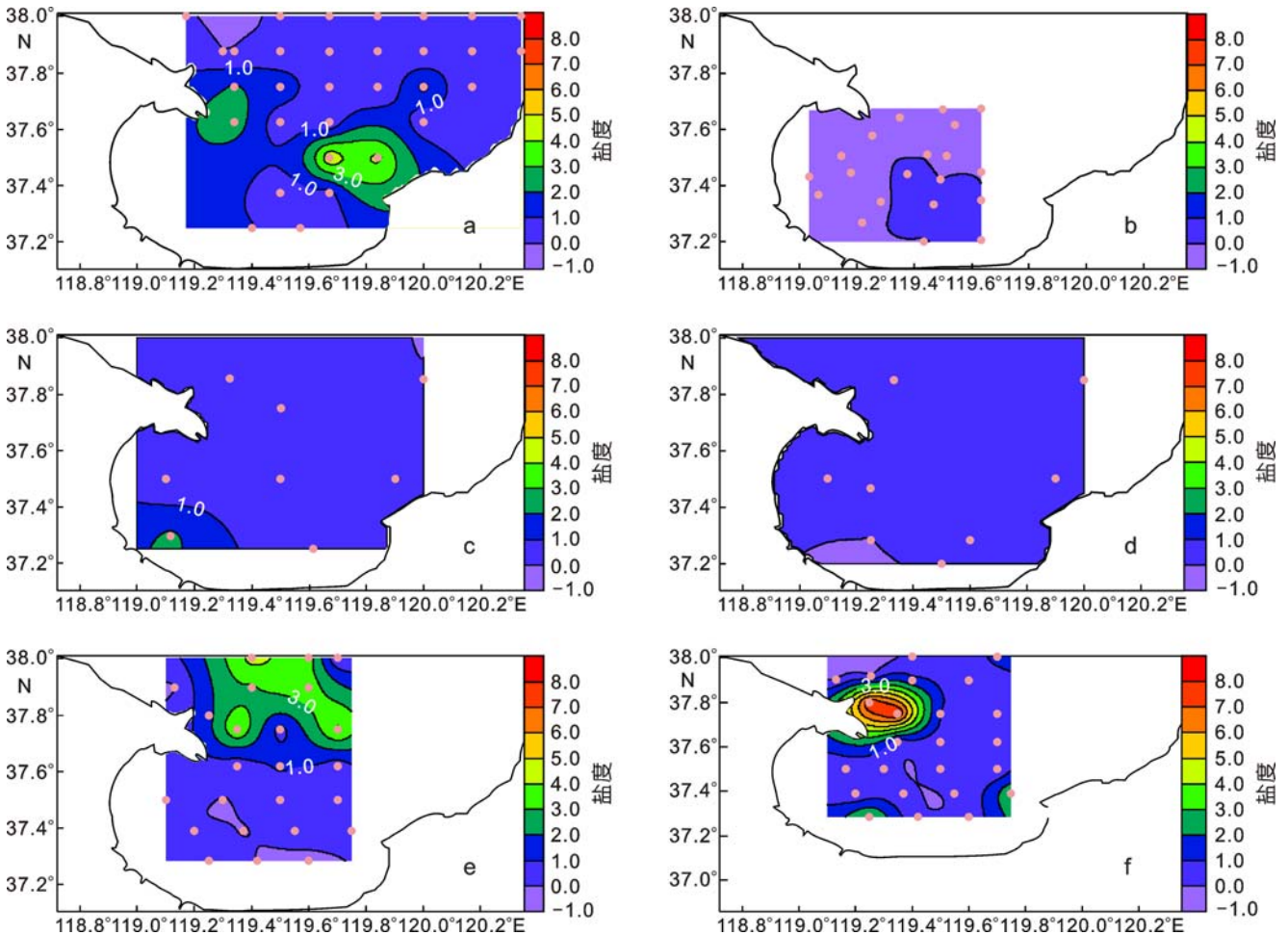


图2 2000年8月(a)、2002年8月(b)、2004年9月(c)、2005年5月(d)、2005年7月(e)及2005年9月底盐度差值分布(f)(图中圆点表示观测点位置)

Fig.2 The salinity difference at sea surface to that at sea bottom

度观测时则是在此一个月以后,结果显示莱州湾中部盐度与 2000 年调查时相差不大,但莱州湾中部区域因受黄河水的影响盐度较顶部(文中莱州湾湾顶指靠近昌邑,莱州湾南岸地区海域)低。

图 3c 为 2004 年 9 月 15—19 日莱州湾地区表层盐度分布情况,此时莱州湾海域的表层盐度分布呈现出了与前些年明显不同的情况,受黄河第三次调水调沙(第三次调水调沙共分两个阶段,其对利津站的影响时间分别为:第一阶段:6 月 22 日—7 月 3 日,第二阶段:7 月 7 日—7 月 18 日)的影响,湾内海水盐度明显降低,湾内整体盐度开始低于渤海中部海域的盐度。就其水平分布来看,盐度自湾顶向湾外逐次升高,但在河口附近看不到明显的低盐区,与 2002 年的结果相比,似乎说明了低盐信号自河口向湾顶传播的趋势。

图 3d 为 2005 年 5 月 12—16 日在黄河第四次调

水调沙(对利津站的影响时间为 6 月 13 日—7 月 6 日)之前莱州湾海域表层盐度分布情况,此时经过三次调水调沙过程,莱州湾内的盐度已明显低于渤海中部地区。调水调沙过程中黄河水的大量输入对莱州湾盐度的短期变化起到了重要作用。这时莱州湾顶的盐度仅为 28.4,并且等盐度线基本上由湾顶向湾外依次增高。而湾外的盐度与 2000 年相比变化不大,湾顶有很大降低,黄河河口附近只是略有降低。与 2004 年 9 月相比,盐度有所上升,特别是莱州湾顶盐度增加最大,这反映了在径流较小的情况下蒸发的作用,因为这里水比较浅,同样的蒸发量更易使盐度升高。

图 3e 是 2005 年 7 月 8—10 日黄河第四次调水调沙刚刚结束时莱州湾表层的盐度分布。从图中可以看出,莱州湾内存在大片低盐区,且黄河水的大体走向为三部分,分别为向南至莱州湾内、沿黄河口向东及向北扩散到渤海中部海区,且以南部最多,其次为东

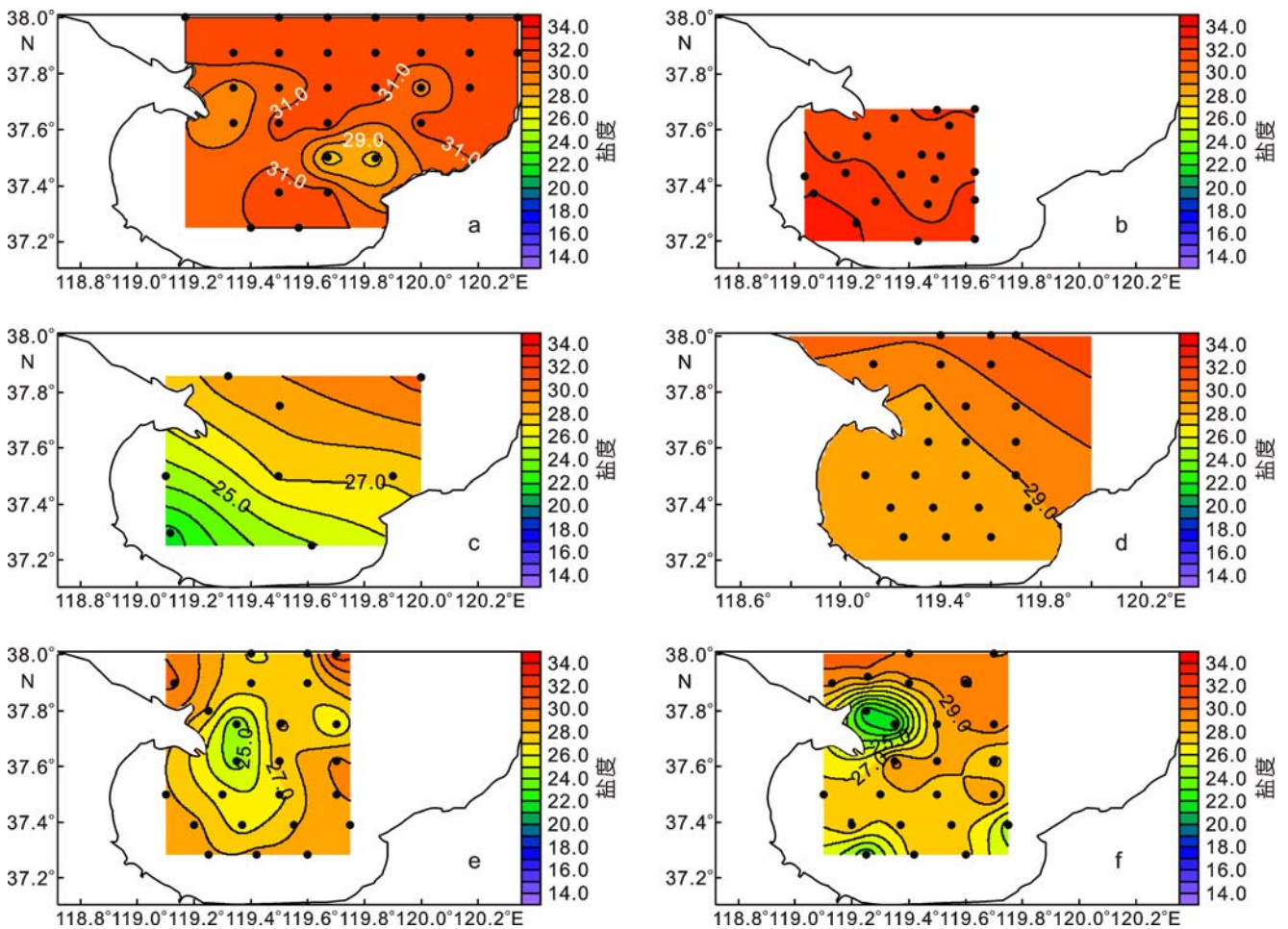


图 3 2000 年 8 月 (a)、2002 年 8 月 (b)、2004 年 9 月 (c)、2005 年 5 月 (d)、2005 年 7 月 (e) 及 2005 年 9 月莱州湾表层盐度分布(f)(其中圆点表示观测点位置)

Fig.3 The distribution of sea surface salinity

向。黄河口北部尤其是西北部盐度仍然较高,说明黄河入海径流量的增加对渤海表层盐度分布的影响主要体现在莱州湾,而渤海湾内表层盐度仍然偏高,对黄河入海径流量增加的反应不明显。

图 3f 是 2005 年 9 月份汛期将要结束时莱州湾地区的表层盐度分布,此时莱州湾内的淡水区范围较 7 月份明显减小,并不再向北及向东扩展,仅存在于黄河口附近及其南部海域,黄河口北部海区盐度较 7 月份呈现出升高的趋势。

图 4a、b 分别是 2005 年 7 月和 9 月份对莱州湾进行走航获得的表层盐度分布,观测方法是从海表面连续抽水至储水桶中,然后以 RBR-420CTD 以 0.33Hz 的频率取样得到,最后通过仪器时间与采样 10 Hz 的差分 GPS 的时间对应得到航迹点上的盐度,这样得到的数据沿航线的空间分辨率是 9 m。图 4a、b 更清楚地反应了黄河水进入莱州湾后的分布状况,较图 3e、f 更详细地描述了莱州湾表层盐度对黄河入海径流的响应及黄河入海径流在莱州湾里的走向。图 4a 中河口处最低盐度值为 13,图 4b 中最低盐度值为 19,更加精细地刻画出了黄河淡水通量对莱州湾盐度的影响。结合图 4b 综合分析,图 3f 中调查区域西南方向的低盐区可能是由于陆地上其它入海径流所致,如小清河等(张洪亮等,2006)。至于等值线的锯齿状抖动,则是由于潮流振荡带来的变化被高分辨率的采样方式反映了出来。

由此得出黄河入海径流量对渤海的影响主要体现在莱州湾的盐度变化上,莱州湾内的盐度随黄河

入海径流的增大而降低;大部分黄河入海径流进入莱州湾后,有向莱州湾湾顶传播的趋势。

### 2.3 莱州湾平均盐度的年际及季节变化

从上面的分析可以得出,自 2003 年以来黄河入海径流量的增加,对渤海尤其是对莱州湾的盐度变化产生了显著影响。为了反映这种影响,作者利用各次观测得到的数据,计算了整个莱州湾的平均盐度。

目前所谓的盐度是通过电导率来定义的,但最初盐度是表示海水中含盐量的多少,电导率只是为了快速准确地检测而找到的一个中间量,因此这里的盐度还是使用其初始的概念,认为盐度约为海水中盐的千分比浓度,即含盐量为盐度乘以水体体积,而平均盐度是用逐层积分得到的总盐量与所测量区域的水体体积之比得到的。表 2 是 2000—2005 年对莱州湾进行的 6 次大面调查得到的莱州湾平均盐度。如表 2 中所示,2000 年 8 月及 2002 年 8 月莱州湾平均盐度分别为 32.6、32.3,而同为夏、秋季观测的(2004 年 9 月、2005 年 7 月及 2005 年 9 月)平均盐度则分别为 29.2、29.2、29.3,较 2000 年及 2002 年同期下降了 3 左右。由此说明自 2003 年黄河入海径流量开始增加以来,莱州湾平均盐度发生了显著降低的变化。

为排除降水等短期信号对观测盐度的影响,特做如下讨论:因海上的降水资料比较难获取,参照各次观测所有月份莱州湾周边县市的月降水资料(表 3)来考虑莱州湾的降水情况。假设观测所在月份的降水完全集中在观测前一天(设其降水量为  $P$ ),在短期过

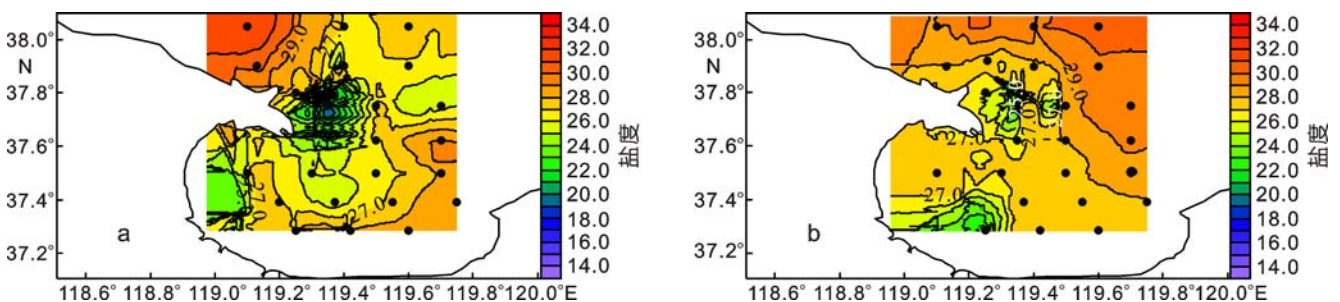


图 4 2005 年 7 月莱州湾表层高分辨率盐度分布(a)、2005 年 9 月莱州湾表层高分辨率盐度分布(b)  
(其中圆点表示观测点位置)

Fig.4 The distribution of sea surface salinity in high resolution

表 2 2000—2005 年各次观测时莱州湾平均盐度  
Tab.2 The average salinity (S) of each observation from 2000 to 2005

时间(年-月)	2000-08	2002-08	2004-09	2005-05	2005-07	2005-09
S	32.6	32.3	29.2	31.2	29.2	29.3

程中暂不考虑蒸发、水交换及其它条件对盐度的影响, 则莱州湾中某一点的平均盐度变为  $\frac{H \times S}{H + P}$ ,  $H$  为该点深度,  $S$  为其降水前盐度。而莱州湾的平均盐度也可近似为  $\frac{\bar{H} \times \bar{S}}{\bar{H} + P}$ ,  $\bar{H}$  为莱州湾平均深度,  $\bar{S}$  为其降水前平均盐度。因  $\bar{H} < 10\text{m}$  (冯士筭等, 1999), 在此取  $\bar{H} = 9\text{m}$  做定量分析。以表 3 中最大降水量 264.4 mm 为例, 莱州湾平均盐度变为  $0.97\bar{S}$ , 也就是盐度变化小于 1。显然即使在此极端情况下, 短期大量降水对莱州湾平均盐度所产生的影响仍比 2003 年后黄河入海径流量显著增加所带来的影响要小得多。也就是说即使存在降水所带来的短期影响, 仍然改变不了莱州湾平均盐度在 2003 年后显著降低的结论。

#### 2.4 莱州湾平均盐度降低原因初步分析

由上述分析可知, 自小浪底水库蓄水基本完成及调水调沙工程的实施以来, 黄河入海径流量较此前大幅度增加(表 4), 莱州湾作为渤海中对黄河入海径流变化响应最敏感的地区, 其平均盐度亦会随大量黄河水的输入发生显著的变化。因黄河在汛期的入海径流量要明显大于其它时段, 自 2002 年国家开始利用汛期实施调水调沙(表 5)冲刷下游河道以来, 汛

期黄河入海径流量在其年入海径流量中占有相当大的比例。因此在汛期之后, 莱州湾平均盐度会有显著降低, 而汛期之后受黄河入海径流量的减少及莱州湾地区蒸发强烈且降水稀少的气候特点影响, 莱州湾平均盐度存在回升的季节变化, 但与往年同期相比, 仍为下降趋势。因此, 虽然莱州湾平均盐度存在季节性的回升现象, 但其在 2003 年黄河入海径流量大幅度增加后显著降低的变化仍为主要趋势。

### 3 莱州湾盐度的箱式模型

#### 3.1 模型建立

为了定量地研究莱州湾的盐度变化, 建立了一个箱式模型来模拟莱州湾的盐和水的收支情况。将莱州湾考虑成一个简单的海湾, 其中的海水体积为  $V$ , 有一条河流输入淡水, 径流量为  $R$ , 海表面有蒸发和降水, 蒸发率和降水率分别为  $E$  和  $P$ , 海湾和外海相连, 通过边界由外海流入的流量为  $FI$ , 通过边界向外海流出的流量为  $FO$ 。外海的盐度为  $SA$ , 湾内的盐度为  $S$ 。在上述这些过程中, 海湾内的盐度会发生改变。

在模型中做以下几个假定: (1) 莱州湾内海水的体积始终保持恒定; (2) 河流入海径流、降水、蒸发及与外海的水交换对海湾盐度的影响相互独立;

表 3 2000—2005 年各次观测所在月份莱州湾周边地区降水情况( $\times 10^{-1}\text{mm}$ )  
Tab.3 The monthly precipitation around the Laizhou bay from 2000 to 2005( $\times 10^{-1}\text{mm}$ )

时间(年-月)	2000-08	2002-08	2004-09	2005-05	2005-07	2005-09
昌邑	1240	1240	655	469	2148	966
东营	1204	406	638	509	1351	1013
垦利	560	590	680	480	1177	801
莱州	1384	639	255	454	1309	708
龙口	1097	1630	424	343	1052	735
寿光	2644	783	593	705	905	1233

表 4 2000—2005 年黄河年入海径流量( $R$ )  
Tab.4 The Huanghe (Yellow) River discharge from 2000 to 2005 ( $R$ )

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005
$R (\times 10^8\text{m}^3)$	41.74	40.89	34.62	189.60	196.18	204.08

表 5 2002—2005 年黄河调水调沙要素  
Tab.5 Major information of flow-sediment regulation experiment in Huanghe River from 2002 to 2005

年份	水文站	调水调沙起止时间	输水量 ( $\times 10^8\text{m}^3$ )
2002	利津	7月7日2时—7月21日2时	23.2
2003	利津	9月9日8时—9月23日8时	27.7
2004(第1阶段)	利津	6月22日6时—7月3日6时	22.3
2004(第2阶段)	利津	7月7日6时—7月18日6时	22.6
2005	利津	6月13日14时—7月6日14时	41.8

(3) 海湾平均盐度对上述各种影响因素的响应是瞬时的, 因此箱内海水是瞬间混合充分的; (4) 外海水的盐度均一稳定, 不受与海湾进行水交换的影响。

在假定(3)下, 根据海湾的水量守恒和盐量守恒, 可以得到下面两个关系式:

$$dV/dt = R + P - E + FI - FO \quad (1)$$

$$d(V \cdot S)/dt = FI \cdot SA - FO \cdot S \quad (2)$$

在假定(1)下, 方程(1)化为

$$R + P - E + FI - FO = 0 \quad (3)$$

而根据假定(2),  $FI$  和  $FO$  可以分成两部分, 即不考虑河流径流、蒸发、降水时的水交换  $FI1$  和  $FO1$  (此时必有  $FI1=FO1$ ), 及另一部分的  $FI2$  和  $FO2$ , 这两项是为了弥补因河流径流和蒸发降水造成海湾中的水量变化的, 这两项必定同时至少一项为 0, 根据方程(3)以及  $FI2$ 、 $FO2$  的定义, 若  $R+P-E>0$ , 则  $FO2>0$ ,  $FI2=0$ ; 若  $R+P-E<0$ , 则  $FO2=0$ ,  $FI2>0$ , 统一起来有

$$FI2 = [1 - \text{sgn}(R + P - E)] \cdot \text{abs}(R + P - E) / 2$$

$$FO2 = [1 + \text{sgn}(R + P - E)] \cdot \text{abs}(R + P - E) / 2 \quad (4)$$

带入方程 (2) 并结合假定 (1)  $dV/dt=0$  有

$$dS/dt = ((FI1 + FI2)/V) \cdot SA - ((FO1 + FO2)/V) \cdot S \quad (5)$$

于是, 数值求解常微分方程(5)即可得到海湾平均盐度的时间变化曲线。

求解时采取分步法, 已知  $t$  时刻的盐度  $S(t)$ , 设一中间变量  $S^*$ ,

$$(S^* - S(t)) / \Delta t = (FI2/V) \cdot SA - (FO2/V) \cdot S(t)$$

$$(S(t + \Delta t) - S^*) / \Delta t = (FI1/V) \cdot SA - (FO1/V) \cdot S^*$$

这样新的时刻的盐度  $S(t+\Delta t)$  就求出来了。

在求解方程 (5) 时,  $V$  是已知的,  $R$ 、 $P$ 、 $E$  均可从观测资料中获得, 从而  $FI2$ 、 $FO2$  就可以知道, 而  $FI1$  或  $FO1$  可以利用半交换时间的概念来获得。半交换时间为某海域保守物质浓度通过对流扩散稀释为初始浓度一半所需的时间, 代表了该海域的交换能力。

海湾中保守物质只有在水交换时, 其浓度变化规律是

$$C = C_0 e^{-Ft/V}$$

其中  $C_0$  是初始浓度,  $V$  是体积,  $F$  是水交换率, 这里假定是恒定的。如果  $C=C_0/2$ , 相应的时间  $t=T$  即为海湾的半交换时间。于是  $F/V = -\ln\left(\frac{1}{2}\right)/T$ , 从而只要知道了海湾的半交换时间就可以求出  $FI1/V$  或  $FO1/V$ 。

因此结合莱州湾的情况, 只要知道莱州湾的体积和初始盐度, 黄河的径流量, 莱州湾的蒸发、降水和莱州湾的半交换时间, 以及外海的盐度, 莱州湾的盐度变化就可以计算出来。

### 3.2 模型数据

在本模型中所用的蒸发量和降水量为莱州湾周边的寿光、垦利、东营、昌邑、莱州、龙口等 6 个气象台站 2000—2005 年的蒸发降水量资料的月平均值, 所计算海域总面积为  $8.00 \times 10^9 \text{m}^2$ , 体积约为  $6.28 \times 10^{10} \text{m}^3$ 。外海水进入是因风、潮汐、密度梯度等所引起的外海水与莱州湾内海水的混合导致的盐量交换。外海水的盐度由多年渤海海峡观测资料的平均值确定为 31.6 (刘哲等, 2003; 吴德星等, 2004)。魏皓等 (2002) 采用 HAMSOM——三维斜压分层平均半隐模式, 在不考虑黄河径流的情况下, 数值求得莱州湾的半交换时间为 188 天。在模型计算中用到的黄河入海径流量为黄河利津站 2000—2005 年月平均入海径流量资料 (黄河水资源公报, 2000—2005<sup>1)</sup>; 中国河流泥沙公报 2000—2005<sup>2)</sup>)。模式中参与计算的黄河入海径流量均为扣除利津下游引水量后的实际入海径流量 (黄河水资源公报, 2000—2005<sup>1)</sup>; 中国河流泥沙公报 2000—2005<sup>2)</sup>)。

### 3.3 模型结果及分析

通过莱州湾的半交换时间可得出每月莱州湾以水交换方式通过边界的流量为  $FI1=FO1=0.69 \times 10^{10} \text{m}^3$ , 结合已知的黄河月入海径流量、莱州湾地区月平均蒸发量及月平均降水量, 可由盐度预报方程计算得到莱州湾的月平均盐度 ( $S'$ ), 如图 5。

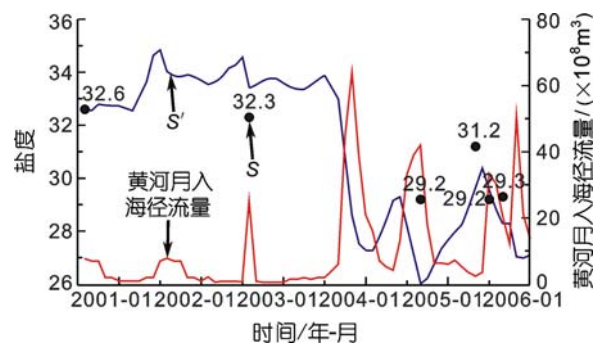


图 5 2000 年 8 月—2005 年 12 月莱州湾月平均盐度 ( $S'$ ) 的随时间的变化曲线及黄河月入海径流量

Fig.5 The monthly discharge of the Huanghe River and the changes in average salinity in the Laizhou Bay from Aug. 2000 to Dec. 2005

1) 水利部黄河水利委员会. 黄河水资源公报. 2000—2005  
2) 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2000—2005

如图 5 所示, 通过此箱式模型计算出的盐度基本能反映这段时期以来莱州湾平均盐度的变化, 且月平均盐度与黄河入海径流量基本呈反比例关系, 当黄河汛期入海径流量较大时,  $S'$  会迅速做出响应, 并随黄河入海径流量的不同而呈不同程度的降低; 而黄河入海径流量较小时, 在蒸发的作用下,  $S'$  呈上升趋势。但个别月份的计算盐度值与真实盐度差别较大, 导致这一现象的原因可能是多方面的: 如黄河入海径流完全进入莱州湾的假设也许与现实有所不同, 也可能是因外海盐度值恒定的假设与现实有偏差所致, 亦可能是海洋中蒸发降水量与海岸地区不一致的原因等等。但是这一箱式模型还是基本反映了莱州湾平均盐度在 2003 年以后显著降低的趋势以及莱州湾内平均盐度存在季节性变化的现象。

### 3.4 敏感性实验

为体现模型的严谨性及验证其准确性, 作者就前述提到的几个不足进行以下敏感性实验: 1) 在保持其它条件不变的情况下, 仅改变模型中的净蒸发量, 以验证模型中采用周边海岸地区气象资料与现实的偏差对模型结果的影响(图 6); 2) 在保持其它条件不变的情况下, 使外海盐度值随季节变化, 以体现模型中采用恒定外海盐度值的假设所带来的误差(图 7)。

当改变模型中的净蒸发量, 使其变为原净蒸发量的 2.0 及 0.5 倍时, 通过模型所计算出的盐度变化曲线如图 6 中的  $S_2$ 、 $S_3$  所示。通过  $S'$ 、 $S_2$  和  $S_3$  的对比可看出, 即使模型中所用的净蒸发量发生改变, 莱州湾的平均盐度也会在 2003 年发生一个较大的变化, 之后年份的平均盐度明显较 2003 年前减小。并且, 在模型所计算时间内, 2003 年前黄河入海流量较 2003 年之后小得多, 而 2003 年前净蒸发量的变化对盐度变化的影响要明显大于 2003 年后的影响, 此亦从另

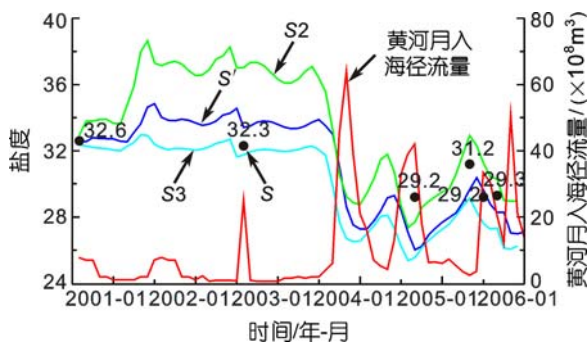


图 6 不同净蒸发量对模型结果的影响

Fig.6 The influence to the model made by different precipitation and evaporation

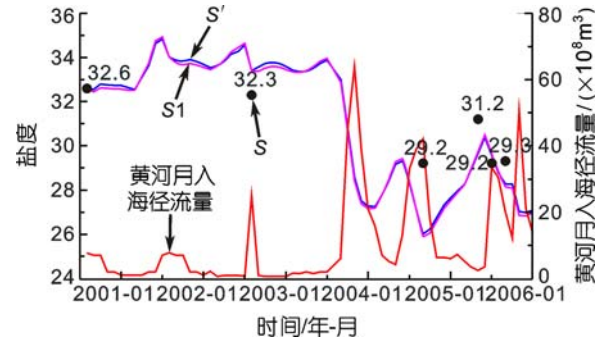


图 7 外海盐度随季节的变化对模型结果的影响

Fig.7 The influence to the model made by monthly changes of the salinity in the open sea

一方面说明黄河入海径流在主导着莱州湾地区平均盐度的变化, 而沿岸气象资料与海洋中气象资料的差别对模型结果趋势的影响不大。当外海盐度发生季节性变化(刘哲, 2003)时, 模型所得盐度变化曲线如图 7 中  $S_1$  所示, 曲线  $S_1$  与外海盐度恒定状态下的计算结果  $S'$  基本吻合, 说明外海盐度的变化对本模型的影响基本可以忽略。

由以上分析可得, 虽然模型中一些参数难以准确确定, 但这些不确定性并不足以影响模型结果的基本形态, 从而本模型可较好地模拟现阶段莱州湾平均盐度的变化。

## 4 讨论

在模型所讨论的影响莱州湾平均盐度的因素中, 黄河入海径流起到降低莱州湾平均盐度的作用, 海表的净蒸发有使莱州湾平均盐度增大的作用, 而莱州湾与外海水的交换对莱州湾平均盐度的影响则取决于外海水盐度相对于湾内盐度的大小。黄河入海径流量越大, 莱州湾的平均盐度值则越低。若月净蒸发量(即月蒸发量与月降水量之差)变大, 莱州湾盐度也会随之增大。莱州湾与外海半交换时间越短, 通过交换进入莱州湾的外海水就会越多, 当外海水盐度高于湾内盐度时, 莱州湾平均盐度会升高; 反之, 当外海水盐度低于湾内盐度时, 莱州湾平均盐度会降低。

由此, 如果黄河以后均以较为稳定的径流量入海, 在黄河入海径流量、净蒸发量、莱州湾与外海半交换时间及外海盐度的共同作用下, 莱州湾平均盐度将趋向于稳定(本文作者认为, 当某一年各月盐度与其后年份中相对应各月盐度之差均小于 0.1 时, 莱州湾平均盐度达到稳定), 并呈现出较为规律的季节性变化。以下对影响莱州湾盐度的各个因子与莱州湾



平均盐度变化趋势的关系做讨论。

1) 黄河入海径流量与莱州湾平均盐度的变化趋势的关系。在保持莱州湾地区净蒸发量和莱州湾与外海的半交换时间不变的前提下,假设 2005 年以后几年间的黄河径流量与 2005 年的黄河入海径流情况[记 2005 年的黄河入海径流情况为  $R(m)$ ,  $m$  为月份,取值为 1—12]相同,通过此箱式模型计算可得黄河不同入海径流量下莱州湾月平均盐度趋向稳定呈规律的季节性变化时的盐度。但由于净蒸发量随季节变化的原因,黄河不同入海径流下莱州湾平均盐度趋向稳定后所呈现的规律的季节性变化并不相同。

图 8 是 2005 年黄河各月份入海径流量,图 9 是黄河不同入海径流量下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线。对比图 8 与图 9 可知,1—5 月份,由于黄河入海径流量比较小,莱州湾平均盐度一直呈回升趋势,至 6 月份之后黄河进入汛期,大量黄河水入海,致使盐度迅速降低;对比 6—8 月的黄河入海径流量及同一黄河入海径流量下盐度变化的斜率可得,黄河入海径流量越大盐度降低得越快;9 月份由于黄河入海径流量的减小,盐度出现回升趋势,但因 10 月黄河入海径流异常增加,从而使盐度再次出现降低的现象,11 月以后盐度又呈回升趋势。因此莱州湾平均盐度的变化与黄河入海径流量的多少有着紧密联系。对比图 9 中 a、b、c 三条曲线可知,当黄河以不同的入海径流量入海时,莱州湾盐度趋于稳定后的变化趋势大致相同,其月平均盐度的季节性变化亦基本相同。但当黄河完全断流时,如图 9 中的曲线 d 所示,完全由净蒸发量月变化导致的莱州湾盐度变化在时间上较图 9 中 a、b、c 三条曲线所表示的黄河不同流量下的莱州湾盐度变化有一两个月的位相延迟。但当黄河以图 9 中 a、b、c 三条曲线所讨论的流量入海时,莱州湾平均盐度的变化基本决定于黄河入海径流量的变化,黄河径流对莱州湾平均盐度的影响掩盖了由净蒸发量的月变化导致的盐度变化,此亦说明黄河径流对莱州湾盐度变化的影响要大于净蒸发量对它的影响。从图 9 可知,当黄河入海径流量达到 2005 年的 2 倍时,即与 20 世纪 50 年代黄河入海径流量相近时,莱州湾平均盐度最终将稳定在 21.7—26.1 之间变化;若黄河一直以 2005 年的入海径流量入海,则莱州湾平均盐度最终将稳定在 26.7—29.4 之间;当黄河入海径流量减少到 2005 年的一半时,即与 20 世纪 90 年代末期黄河入海径流量相近时,莱州湾平均盐度将稳定在 30.1—31.7 之间;假设黄河完全断流,即

黄河入海径流量为 0,则莱州湾平均盐度将稳定在 34.1—35.2 之间。当然,这只是在 2005 年的降水蒸发、莱州湾与外海半交换时间及外海盐度的前提下,莱州湾平均盐度对黄河不同入海径流量做出的响应。另因不同时期黄河入海口位置不同,及黄河流量发生较大变化时,其进入莱州湾的水量也会发生变化,故本模拟结果与现实状况相比可能存在一定的误差,但由前面的敏感性实验可以知道:在当前条件下,模型结果与现实吻合较好。对比图 9 中各条曲线还可发现,莱州湾平均盐度随黄河入海径流量的变化而变化,黄河入海径流量越大,其趋向于稳定时的盐度值越小,月平均盐度的变化范围越大,且变化曲线的斜率越大;随着黄河入海径流量的减小,莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线趋向缓和。

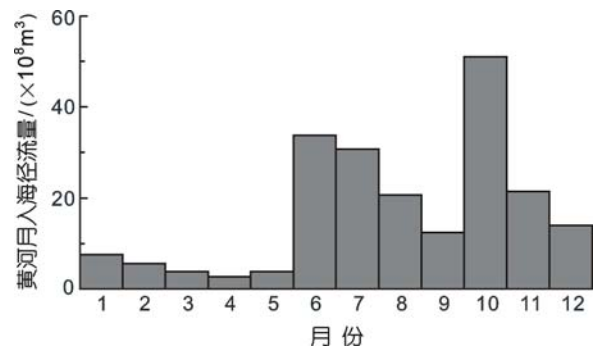


图 8 2005 黄河各月份黄河入海径流量(中国河流泥沙公报 2005, 2006)

Fig.8 The monthly discharge of the Huanghe River in 2005

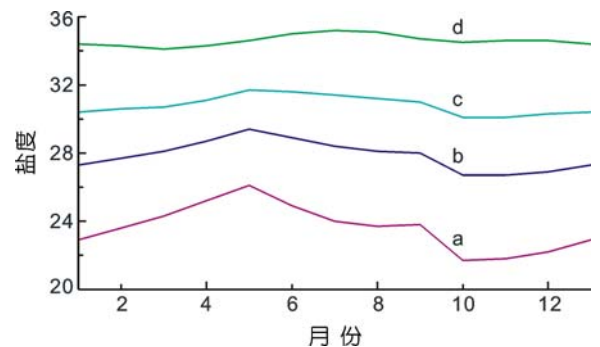


图 9 黄河不同入海径流量下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

Fig.9 The variation curves of monthly average salinity in the Laizhou Bay in the case of different river discharges  
a. 黄河入海径流量为  $2R(m)$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; b. 黄河入海径流量为  $R(m)$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; c. 黄河入海径流量为  $R(m)/2$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; d. 黄河入海径流量为 0 时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

2) 净蒸发量与莱州湾平均盐度的稳定及季节性变化的关系。保持黄河入海径流量及莱州湾与外海的半交换时间不变, 记 2005 年净蒸发量为  $E(m)-P(m)$ , 通过此箱式模型计算可得在不同净蒸发量下莱州湾月平均盐度趋向稳定并呈现出规律的季节性变化的曲线。

图 10 为 2005 年莱州湾地区的月平均净蒸发量。图 11 是不同净蒸发量下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线。莱州湾地区属蒸发多降水少的地区, 且降水基本集中在夏半年, 故如图 8 所示, 净蒸发量在 1—5 月份呈升高趋势, 5 月份以后至 8 月份呈减小趋势, 8—10 月份再次升高, 10—12 月份又呈减小趋势。在黄河没有入海径流影响的情况下, 莱州湾月平均盐度达趋向稳定后的变化情况如图 9 中的曲线 d 所示, 莱州湾月平均盐度在 3—7 月份呈上升趋势, 7 月份至次年 1 月份莱州湾月平均盐度呈缓和的下降趋势。因此莱州湾月平均盐度仅受净蒸发量月变化的影响达到稳定时, 月平均盐度的变化对净蒸发量变化的响应在时间上存在 1—2 个月的延迟。对比图 8 与图 11 可知, 当莱州湾地区月平均净蒸发量发生变化时, 其平均盐度趋向稳定后的变化趋势仍然主要取决于黄河入海径流量的变化, 而对月平均净蒸发量变化的响应不明显, 只是当莱州湾地区月平均净蒸发量越大时, 莱州湾月平均盐度趋向稳定后的盐度值就越高, 且其盐度变化曲线的斜率也就越大。

3) 莱州湾与外海的半交换时间发生变化与莱州湾平均盐度的稳定及季节性变化的关系。保持黄河入海径流量及莱州湾地区净蒸发量不变, 假设莱州湾与外海的半交换时间发生变化, 莱州湾月平均盐度最终将趋向于稳定并呈规律的季节性变化。

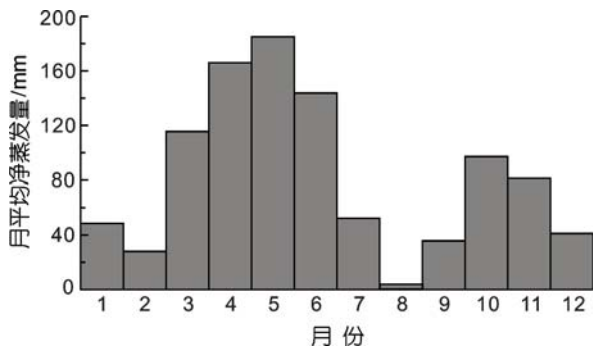


图 10 2005 年莱州湾地区的月平均净蒸发量

Fig.10 The monthly average net evaporation in the Laizhou Bay in 2005

图 12 是莱州湾与外海在不同半交换下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线。对比图 12 中 a、b、c 三条曲线可知莱州湾与外海的半交换时间的愈短, 莱州湾地区月平均盐度趋向稳定后变化曲线的振幅愈大, 斜率亦愈大, 其月平均盐度稳定后的盐度值愈高。结合图 8 可知, 当莱州湾与外海的半交换时间发生改变时, 莱州湾地区月平均盐度趋向稳定后的变化趋势仍基本取决于黄河入海径流量的变化。

4) 外海盐度的改变与莱州湾平均盐度的稳定及季节性变化的关系。保持黄河入海径流量、莱州湾地

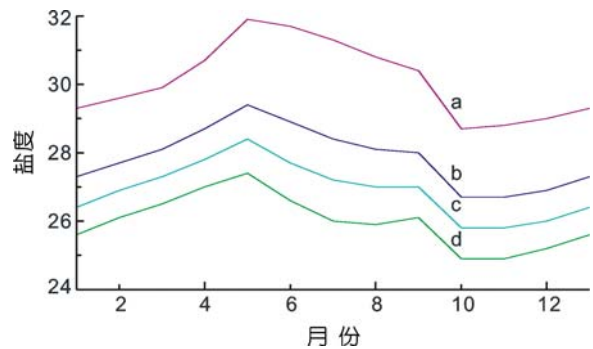


图 11 不同净蒸发量下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

Fig.11 The variation curves of monthly average salinity in the Laizhou Bay in the case of different net evaporation  
a.净蒸发量为  $2[E(m)-P(m)]$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; b.净蒸发量为  $E(m)-P(m)$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; c.净蒸发量为  $[E(m)-P(m)]/2$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; d.净蒸发量为 0 时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

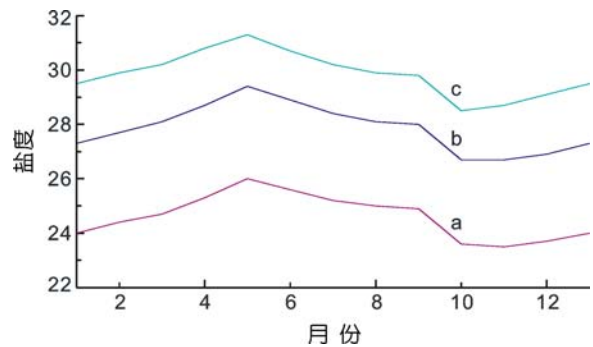


图 12 莱州湾与外海不同半交换时间下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

Fig.12 The variation curves of monthly average salinity in the Laizhou Bay in the case of different half-life time  
a.莱州湾与外海的半交换时间为  $T/2$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; b.莱州湾与外海的半交换时间为  $T$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; c.莱州湾与外海的半交换时间为  $2T$  时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

区净蒸发量及莱州湾与外海的半交换时间不变, 改变外海盐度, 则当外海盐度大于莱州湾盐度时, 外海盐度起到增大湾内盐度的作用; 当其小于湾内盐度时, 则起到与黄河淡水径流相同的作用。此处盐度变化范围取自 1970—1996 年多年平均的渤海海峡盐度变化。

图 13 为不同外海盐度下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线。对比图 13 中各条曲线可知, 外海盐度愈高, 通过交换进入湾内的盐量愈多, 湾内盐度趋向稳定后的盐度值亦愈高, 其变化曲线的振幅与斜率亦愈大。结合图 7, 不同外海盐度下莱州湾地区月平均盐度趋向稳定后的变化趋势仍基本取决于黄河入海径流量的变化。

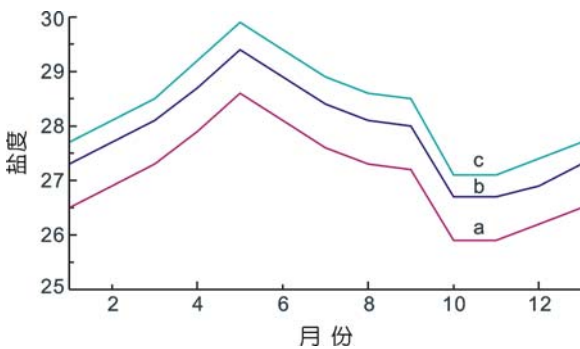


图 13 不同外海盐度下莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

Fig.13 The variation curves of monthly average salinity in the Laizhou Bay in the case of different salinities in the open sea  
a. 外海盐度为 32.1(刘哲等, 2003)时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; b. 外海盐度为 31.6(刘哲等, 2003; 吴德星等, 2004)时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线; c. 外海盐度为 30.7(刘哲等, 2003)时莱州湾月平均盐度稳定后的变化曲线

对比以上 1)、2)、3)、4) 可知, 莱州湾平均盐度变化受黄河入海径流量的影响最大, 且其季节性变化主要由黄河入海径流量的变化引起, 对黄河入海径流量变化的响应较快, 对净蒸发量变化的响应较弱。黄河入海径流量增大、莱州湾与外海的半交换时间以及净蒸发量的增加、外海盐度的升高都会使莱州湾平均盐度趋向稳定后的曲线变化幅度与斜率变大。

## 5 结论

从以上分析得知, 黄河水对渤海的影响主要体现在对莱州湾的影响上, 对渤海其它区域影响不大, 黄河水进入莱州湾后基本分为直接向东及向莱州湾内部扩展两大部分, 也有少许北向的扩展, 但比例较

前两者少得多。在大量黄河入海径流的作用下 2003 年后莱州湾平均盐度较 2003 年之前明显降低, 但每年存在明显的季节变化, 两次汛期之间莱州湾平均盐度存在季节性的回升现象。后经箱式模型模拟, 通过黄河入海径流量、降水、蒸发及与北海水交换等因素可模拟出近年来莱州湾平均盐度的变化趋势, 经过敏感性实验验证, 模型中的不足对盐度变化趋势的影响不大, 模型结果与现实基本吻合, 因而可较好地体现莱州湾盐度存在的季节性变化。通过讨论得出, 莱州湾月平均盐度随黄河入海径流量和净蒸发量的变化而呈季节性的变化, 但主要取决于黄河入海径流量的变化, 且对黄河入海径流量变化的响应较快, 对净蒸发量变化的响应较弱。

由此黄河入海径流量的变化不仅决定了莱州湾平均盐度的年际变化, 而且还主导着莱州湾月平均盐度的变化。而莱州湾盐度的变化, 对莱州湾海洋生态环境的影响是多方面的, 对湾内产卵场、育幼场和海洋生物群落结构都有一定的影响(张洪亮等, 2006)。故黄河对莱州湾盐度产生影响的同时必将对湾内水质及海洋生物资源的生存环境等产生重大的影响。而 2005 年黄河属平水年(中国河流泥沙公报 2005, 2006), 若黄河一直以 2005 年平水年入海径流量入海, 则其年平均盐度最终将稳定在 27.9, 较 2000 年 8 月份平均盐度降低了 4.7, 有效地缓解了近几年盐度升高对莱州湾海洋生态环境带来的危害。但若盐度过低势必会对莱州湾水域的生态环境造成新的破坏, 产生新的影响。因此研究黄河入海径流对莱州湾盐度的影响具有显著的现实意义。

## 参 考 文 献

- 方国洪, 王 凯, 郭丰义等, 2002. 近 30 年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系. 海洋与湖沼, 33(5): 515—525
- 冯士筌, 李凤岐, 李少菁, 1999. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 436
- 刘 哲, 魏 皓, 蒋松年, 2003. 渤海多年月平均温盐场的季节变化特征用形成机制的初步分析. 中国海洋大学学报, 33(1): 7—14
- 江文胜, 苏 健, 杨 华等, 2002. 渤海悬浮物浓度分布与水动力特征的关系. 海洋学报, 24(增 1): 212—217
- 吴德星, 牟 林, 李 强等, 2004. 渤海盐度长期变化特征及可能的主导因素. 自然科学进展, 14(2): 191—195
- 张洪亮, 王建强, 崔文林, 2006. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响. 海洋环境科学, 25(增 1): 11—14
- 郑玉成, 王宗波, 2006. 黄河前 3 次调水调沙试验对河口区段的影响. 人民黄河, 28(2): 24—29

- 赵章员, 孔令辉, 2000. 渤海海域环境现状及保护对策. 环境科学研究, 13(2):23—27
- 傅命佐, 徐孝诗, 程振波等, 1994. 黄渤海海岸季节性风沙气候环境. 中国沙漠, 14(1): 31—40
- 魏 皓, 田 恬, 周 峰等, 2002. 渤海水交换的数值研究——水质模型对半交换时间的模拟. 中国海洋大学学报, 32(4): 519—525
- Lin C L, Su J L, Xu B R *et al*, 2001. Long-term variation of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem. *Progress in Oceanography*, 49:7—19

## SALINITY CHANGE AND INFLUENCING FACTOR IN THE LAIZHOU BAY FROM 2000 TO 2005

ZHAO Peng<sup>1</sup>, JIANG Wen-Sheng<sup>1</sup>, MAO Xin-Yan<sup>1</sup>, GAO Hui-Wang<sup>2</sup>, GUO Xin-Yu<sup>3</sup>

(1. *Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, 266100*; 2. *College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266100*; 3. *Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama, 7908577*)

**Abstract** The influence of Huanghe (Yellow) River discharge on the distribution of salinity in the Laizhou Bay is discussed in this paper, based on the data of cruise observation in the bay in Aug. 2000, Aug. 2002, Sep. 2004, May. 2005, Jul. 2005, and Sep. 2005. It is found that the average salinity after 2003 is obviously lower than that before 2003, and the average salinity changes seasonally with the changes of the river discharge. A box model is established to simulate the changes in the salinity of the bay considering the river discharge, precipitation, evaporation, and the water exchange between the bay and the open sea. It is concluded that the Huanghe River discharge determines not only the annual change of the average salinity, but also the monthly ones in the bay.

**Key words** Laizhou Bay, Salinity, Huanghe (Yellow) River, Discharge