

渤海淡水存留时间分析*

王海燕¹ 高增祥¹ 邹涛¹ 刘光亮¹ 刘哲^{1,2**}

(¹海洋环境与生态教育部重点实验室(中国海洋大学),山东青岛266100;²华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海200062)

摘要 利用渤海蒸发量、降水量、入海径流量、渤海及黄海盐度数据,基于淡水比例方法估算了渤海的淡水存留时间,并设计敏感性实验,定量分析了渤海淡水通量对渤海淡水存留时间的影响。结果表明,渤海年平均(1965—1980、1986—1992、1994、1996年)淡水存留时间为2.6年,并呈现弱上升的趋势。20世纪80年代的淡水存留时间(4.6年)与20世纪60年代(3.0年)相比,增加了近50%。渤海淡水存留时间随淡水输入的增加而缩短。与净降水量(降水量与蒸发量之差)相比,渤海淡水存留时间对入海径流量变化更敏感,因而流域调水的环境规划应予以充分关注。

关键词 入海径流量;盐度;敏感性分析

中图分类号 P731 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)3-0498-06

Freshwater residence time in Bohai Sea. WANG Hai-yan¹, GAO Zeng-xiang¹, ZOU Tao¹, LIU Guang-liang¹, LIU Zhe^{1,2} (¹Key Laboratory of Marine Environment and Ecology (Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266100, Shandong, China; ²State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(3): 498-503.

Abstract: A box model based on freshwater fraction method was used to estimate the freshwater residence time (FRT) in the Bohai Sea. The data used in this study include the evaporation, precipitation, river discharge, and salinity in the Bohai Sea and its surrounding region, the Yellow Sea. Sensitivity analysis was conducted to quantitatively assess the effects of freshwater flux on the water exchange between Bohai Sea and Yellow Sea. The results indicated that the interannual variability in the salinity in Bohai Sea was mainly caused by the freshwater supply from Yellow River, the largest river around Bohai Sea. During the periods of 1965-1980, 1986-1992, 1994, and 1996, the mean FRT in Bohai Sea was 2.6 years, and had a weak upward trend. In the 1960s, the FRT was 3.0 years; but in the 1980s, it increased to 4.6 years, with an increment of about 50%. The FRT decreased with increasing freshwater supply, and in general, was more sensitive to river discharge than to net precipitation flux (the difference between precipitation and evaporation), suggesting that sufficient attention should be paid on the formulation of environmental policy on the regulation of Yellow River water resources.

Key words: river discharge; salinity; sensitivity analysis.

水交换研究一直是近海物质输运研究的核心内容之一,其关注的一个重要过程是淡水存留时间。淡水存留时间通常指所关心的淡水离开控制体所需要的时间(Bolin & Rodhe, 1973; Takeoka, 1984),是反

映海域水交换能力的重要指标。它可以用作研究河口生物化学性质和各种过程时的独立变量(Jay *et al.*, 1997)。现阶段存留时间的研究多以海水为主。

然而,淡水在海域中的作用时间已经引起人们的关注,不同研究考虑的“淡水”来源有所区别。Atkinson等(1978)、Christian等(1991)、Eyre(2000)、Sheldon和Alber(2002)、Wang等(2004)、

* 国家自然科学基金项目(40706007)和河口海岸学国家重点实验室开放课题基金资助项目(200813)。
** 通讯作者 E-mail: zliu@ouc.edu.cn
收稿日期:2009-08-10 接受日期:2009-11-18

Liu 等(2008)对美国、澳大利亚的部分区域和中国台湾淡水河口所作的研究仅以河流(或溪流)输入作为淡水来源;Asselin 和 Spaulding(1993)对美国普罗维登斯河和西康河的研究除以河流作为淡水来源外,还考虑了其他输入,如工业排放淡水;而 Hagy 等(2000)、Yanagi(1999)对美国帕图森河口和日本博多湾的研究除了考虑河流、降水等的输入外,还包括了蒸发的输出,以河流、降水和蒸发三者共同作用的淡水通量计算了控制体内淡水的变化。

渤海是我国最大的内海,它通过东面的渤海海峡与黄海相沟通,总面积 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均深度仅 18 m(冯士筰等,1999)。本文采用淡水比例方法(fraction of freshwater method)(Dyer,1973)计算淡水在渤海中的存留时间,并尝试分析其与渤海淡水通量的关系,旨在为进一步研究渤海的水交换能力及相关的环境与生态问题等提供参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 计算方法

本文以渤海淡水通量(即:径流量 + 降水量 - 蒸发量)作为渤海“淡水”的来源。方法假设近海盐度低于外海,且淡水通量为正值。渤海淡水存留时间 τ_f 的计算公式为:

$$\tau_f = \frac{V_f}{V_R} \quad (1)$$

式中: V_f 为渤海淡水储量; V_R 为渤海淡水通量。

其中:

$$V_f = \frac{(S_0 - S_i)}{S_0} V \quad (2)$$

$$V_R = Q + P - E \quad (3)$$

式中: S_0 为黄海盐度; S_i 为渤海盐度; V 为渤海水体体积; Q 为渤海入海径流量; P 为降水量; E 为蒸发量。

1.2 数据来源

所用数据主要包括渤海与黄海年均水体盐度、渤海年蒸发量和降水量、年入海径流量。数据来源与处理方法详见表 1。

由于 1981—1985 年渤海盐度高于黄海,其原因是这些年份持续的低温使渤海淡水较多转化为海冰,促使黄海暖流带来的高盐水北上增强,并西侵进入渤海(江蓓洁等,2007)。并且 1995 年的淡水通量为负值,不适用于 1.1 的计算方法,故上述年份数据舍去。再者,1993 年黄海水体盐度资料缺失。因此,下面分析使用的计算数据(图 1)涉及年份为 1965—1980、1986—1992、1994、1996 年。

1.3 统计方法

采用相关分析和回归分析方法研究渤海盐度与其他因素的关系;采用回归分析方法研究渤海淡水储量、淡水通量、淡水存留时间随年份的变化;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)方法研究新计算的淡水存留时间(公式中不直接包含渤海盐度项)与原淡水存留时间是否有显著性差异。

表 1 数据来源与处理方法

Tab. 1 Data sources and adjustment

种类	年份	数据来源	处理方法
渤海年均水体盐度	1965—1996	渤海 1965—1996 年沿岸海洋站(龙口、塘沽、秦皇岛、芷锚湾、鲅鱼圈和长兴岛)年均表层盐度资料(Lin <i>et al.</i> , 2001)	利用多年平均(1970—1996 年)表层盐度(30.27)与水体盐度(30.81,刘哲等,2003)的差值(0.54)校正
黄海年均水体盐度	1965—1992、1994—1996	黄海 1977—1983、1985、1987—1992、1994—1995 年冬季和夏季的表、底层盐度资料;1984、1986、1996 年夏季表、底层盐度资料(江蓓洁等,2007)	1977—1983、1985、1987—1992、1994—1995 年均水体盐度采用冬季和夏季表、底层盐度均值;1984、1986、1996 年夏季水体盐度采用夏季表、底层盐度均值,然后利用多年平均(1977—1983、1985、1987—1992、1994—1995 年)夏季水体盐度(31.56)与年均水体盐度(31.72)的差值(0.16)校正,得到 1984、1986、1996 年年均水体盐度
		国家海洋资料中心 WOD05 数据库 1965—1980 年黄海水体盐度分析资料	利用数据库多年平均(1977—1980 年)水体盐度与实测水体盐度(江蓓洁等,2007)的差值(0.63)校正,得到 1965—1976 年年均水体盐度
渤海年蒸发量、年降水量	1965—1996	欧洲中期天气预报中心 ERA 40 数据库中蒸发量、降水量资料,单位为 m	利用数据库蒸发量、降水量资料分别乘以渤海面积,得到渤海年蒸发量、降水量
渤海年入海径流量	1965—1996	黄河(Wang,2008)、辽河(褚忠信,2006)、海河(郑建平等,2005)1965—1996 年入海径流量;滦河(Feng & Zhang,1998)1965—1993 年入海径流量	1965—1993 年渤海年入海径流量采用黄河、辽河、海河、滦河年入海径流量之和,将 1994—1996 年黄河入海径流量利用多年平均(1965—1993)黄河占渤海入海径流量的比例(72%)校正,得到 1994—1996 年渤海入海径流量

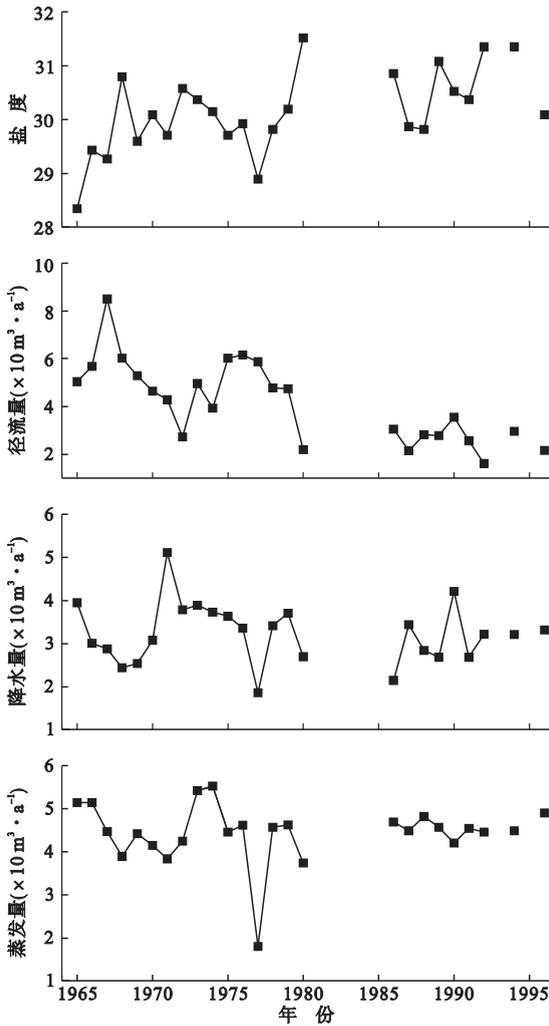


图1 渤海盐度、入海径流量、降水量和蒸发量的年际变化
Fig. 1 Interannual change of salinity, river discharge, precipitation and evaporation in Bohai

2 结果与分析

2.1 渤海盐度

在研究不同因素对渤海淡水存留时间的影响时,为了保证因素之间的独立性,淡水存留时间的计算公式中不能直接包含渤海盐度项。

视渤海盐度(S_i)为反应变量,渤海入海径流量(Q)、降水量(P)、蒸发量(E)、黄海盐度(S_0)为协变量。回归结果为:

$$S_i = -1.1187 \ln Q + 31.6603 \quad (R^2 = 0.3782) \quad (4)$$

式中, Q 单位为 $10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。回归过程中,降水量、蒸发量和黄海盐度未通过显著性检验,故在式(4)中舍去。吴德星等(2004)的研究也发现,如果不考虑渤海海水交换的作用,黄河径流量锐减对渤海盐

度升高的贡献率最大。

将式(2)、式(3)、式(4)代入式(1),得到

$$\tau_f = \frac{(S_0 + 1.1187 \ln Q - 31.6603)V}{S_0(Q + P - E)} \quad (5)$$

式中 τ_f 、 Q 、 P 、 E 、 V 的单位依次为 a 、 $10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 、 10^{10} m^3 。单因素方差分析表明,式(5)计算出的淡水存留时间与式(1)、式(2)、式(3)计算的淡水存留时间之间无显著性差异($F=0.002$ $n=25$ $P=0.967$)。

2.2 淡水储量和淡水通量

由式(2)和式(3),计算得到渤海年际淡水储量、淡水通量(图2)。将它们关于年份作回归,得到线性回归方程:

$$V_f = -0.3300(\text{year} - 1964) + 12.6009 \quad (R^2 = 0.5397) \quad (6)$$

$$V_R = -0.1411(\text{year} - 1964) + 5.0782 \quad (R^2 = 0.5110) \quad (7)$$

式中 year 为年份; V_f 为淡水储量,单位为 10^{10} m^3 ; V_R 为淡水通量,单位为 $10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

渤海多年平均(1965—1980、1986—1992、1994、1996)淡水储量为 $7.72 \times 10^{10} \text{ m}^3$,淡水通量为 $2.97 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。淡水储量呈现出下降的趋势,20世纪80年代($4.12 \times 10^{10} \text{ m}^3$)与20世纪60年代($13.28 \times 10^{10} \text{ m}^3$)相比,减小了近69%,90年代($3.68 \times 10^{10} \text{ m}^3$)进一步减小。淡水通量的变化趋势与淡水储量类似。80年代($0.90 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)与60年代($4.46 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)相比,减小了近80%。虽然90年代($1.39 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)淡水通量高于80年代,但仍小于60年代和70年代($4.06 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)。

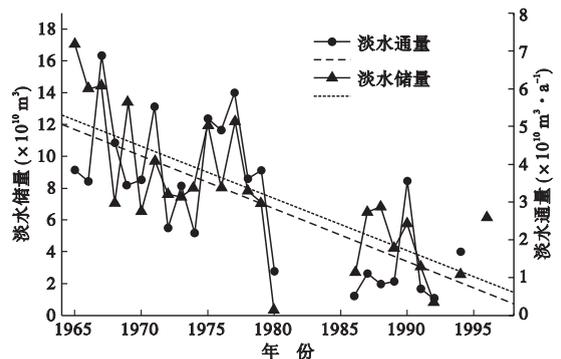


图2 渤海淡水储量和淡水通量的年际变化
Fig. 2 Interannual change of freshwater storage and freshwater flux in Bohai

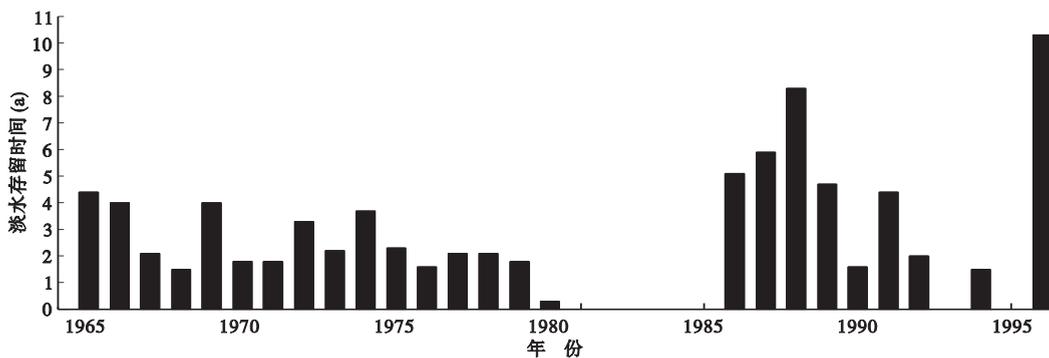


图3 渤海淡水存留时间的年际变化

Fig.3 Interannual change of freshwater residence time

2.3 淡水存留时间

式(1)、式(2)、式(3)的计算结果(图3)表明,渤海多年平均的淡水存留时间为2.6年。该结果与渤海0.5~3.5年的半交换时间(魏皓等,2002)在量级上一致。但魏皓等(2002)研究的是渤海海水浓度稀释1/2的半交换时间,与本文的研究内容有所不同。

由图3可以看出,渤海淡水存留时间呈现出明显的年际变化,总体上呈现弱上升的趋势。20世纪80年代的淡水存留时间(4.6年)与20世纪60年代(3.0年)相比,增加了近50%。最大值(10.3年)和最小值(0.3年)分别出现在1996和1980年。

将式(1)、式(2)、式(3)计算得到的渤海淡水存留时间关于年份作线性回归,结果为:

$$\tau_f = 0.0906(\textit{year} - 1964) + 1.9605 \quad (R^2 = 0.1473) \quad (8)$$

式中 \textit{year} 为年份, τ_f 为淡水存留时间,单位为年。

2.4 渤海淡水通量对淡水存留时间影响的敏感性

淡水存留时间的变化在很大程度上取决于淡水输入的变化(Pilson,1985),而渤海淡水通量(即净淡水输入)由渤海降水量、蒸发量和入海径流量三者组成。因此,由式(5)分析渤海降水量、蒸发量和入海径流量对渤海淡水存留时间的不同影响。

2.4.1 渤海降水量和蒸发量的影响 设计敏感性实验,渤海净降水量(即降水量与蒸发量之差)以 $0.1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的间隔在 $[-2.52, 1.28] \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的范围内变动。计算斜率绝对值时,采用该净降水量前后2个净降水量所对应的淡水存留时间之差除以2倍间隔,单位为 $\text{a} \cdot (10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})^{-1}$ 。淡水存留时间随净降水量的增加而减小。当净降水量为负,即降水量小于蒸发量时,存留时间的变化较

快。当净降水量为正,即降水量大于蒸发量时,存留时间变化趋于缓慢。斜率绝对值介于 $0.28 \sim 2.59 \text{ a} \cdot (10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})^{-1}$ 。

2.4.2 渤海入海径流量的影响 设计敏感性实验,入海径流量以 $0.1 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的间隔在 $[1.59, 8.49] \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 的范围内变动。计算斜率绝对值时,采用该径流量值前后2个径流量所对应的淡水存留时间之差除以2倍间隔,单位为 $\text{a} \cdot (10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})^{-1}$ 。此时,淡水存留时间及斜率绝对值的变化如图4所示。

淡水存留时间随入海径流量的增加呈现出减小的趋势,斜率绝对值介于 $0.14 \sim 10.57 \text{ a} \cdot (10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})^{-1}$ 。当入海径流量低时,很小的径流量变动即可使淡水存留时间明显变化;当入海径流量高时,存留时间的变化趋于平缓。这与 Alber 和 Sheldon (1999)的研究结果一致,Alber 和 Sheldon(1999)对美国佐治亚州河口系统的研究发现,在径流量高时,净化时间相对稳定;在径流量低时,净化时间变化很快。

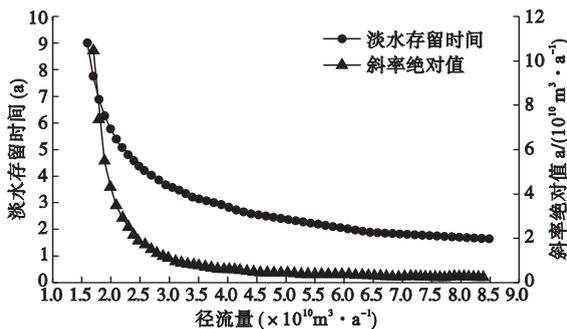


图4 淡水存留时间与入海径流量的关系

Fig.4 Relationship between freshwater residence time and river discharge

黄河多年平均径流量占渤海入海径流量的72%,因此黄河径流量对渤海淡水存留时间的变化起到十分重要的作用。而自20世纪50、60年代,黄河利津站以上年平均引水量分别为 1.35×10^{10} 和 $1.60 \times 10^{10} \text{ m}^3$,70年代以来,其年均引水量超过 $2.30 \times 10^{10} \text{ m}^3$,到90年代,引水量仍保持在 $2.53 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (李希宁和刘曙光,2004)。由于黄河引水量急剧增加和其他因素的共同作用,与70年代以前相比,现阶段的黄河入海径流量已显著减少。因此,在现阶段黄河径流量总体较低的水平下,如果黄河径流量增加,淡水存留时间很可能会明显减小。

2.4.3 不同因素影响大小 这里利用渤海淡水存留时间在不同因素多年平均值附近的变化值($\Delta\tau$)来分析不同影响因素对淡水存留时间变化的影响大小。

$$\Delta\tau = \tau'U \quad (9)$$

式中 τ' 为某因素多年平均值所对应淡水存留时间的斜率绝对值, U 为该因素原实测序列的标准差。渤海降水量和蒸发量之差、入海径流量的 $\Delta\tau$ 值依次为0.74和0.89年。

因此,渤海淡水存留时间的主要影响因子为入海径流量,然后为降水量和蒸发量之差。在其他海域的研究中也得到相似的结论。如,台湾淡水河口的存留时间随径流输入的增加而缩短,二者的关系可用有效的回归方程表示(Liu *et al.*, 2008)。

2.4.4 渤海淡水存留时间与其他海域比较 渤海年平均淡水储量为 $7.72 \times 10^{10} \text{ m}^3$,淡水存留时间为2.6年。即渤海单位淡水体积的存留时间为 $0.01 \times 10^{-6} \text{ d} \cdot \text{m}^{-3}$ 。渤海环流由潮、风、密度三者综合影响,渤海与黄海的水交换是由潮、风和密度三者共同作用(Huang *et al.*, 1999)。Yanagi(1999)对日本博多湾的研究表明,湾内存在很强的河口环流。该湾淡水存留时间为8 d,月淡水通量为 $6.60 \times 10^7 \text{ m}^3$,因此,该湾淡水储量为 $1.76 \times 10^7 \text{ m}^3$,单位淡水体积的存留时间为 $0.45 \times 10^{-6} \text{ d} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此,对单位淡水体积的存留时间而言,渤海比博多湾短。

3 结论

从以上分析可知,渤海多年平均(1965—1980、1986—1992、1994、1996年)淡水存留时间为2.6年。渤海淡水存留时间随降水量和蒸发量之差、入

海径流量的增加均呈现出减小的趋势,其主要影响因子为入海径流量,然后为降水量和蒸发量之差。而黄河多年平均径流量占渤海入海径流量的70%以上(李泽刚,2000),其入海径流量对渤海入海径流总量的变化起到十分显著的作用。但由于人类活动和其他自然因素的影响,与20世纪70年代以前相比,现阶段黄河的入海径流量已经明显减少。因此,应该充分重视人类活动对黄河水的合理调配和利用。

参考文献

- 褚忠信. 2006. 三峡水库一期蓄水对长江泥沙的影响(博士学位论文). 青岛:中国海洋大学.
- 冯士筴,李凤岐,李少菁. 1999. 海洋科学导论. 北京:高等教育出版社.
- 江蓓洁,鲍献文,吴德星,等. 2007. 北黄海冷水团温、盐多年变化特征及影响因素. 海洋学报,29(4):1-10.
- 李希宁,刘曙光. 2004. 影响黄河河口来水来沙量的因素分析. 人民黄河,26(9):15-16.
- 李泽刚. 2000. 黄河口附近海区水文要素基本特征. 黄渤海海洋,18(3):21-28.
- 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及形成机制的初步分析. 青岛海洋大学学报,33(1):7-14.
- 魏皓,田恬,周锋,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. 青岛海洋大学学报,32(4):519-525.
- 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.
- 郑建平,王芳,华祖林,等. 2005. 海河河口生态需水量研究. 河海大学学报(自然科学版),33(5):518-521.
- Alber M, Sheldon JE. 1999. Use of a date-specific method to examine variability in the flushing times of Georgia estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49:469-482.
- Asselin S, Spaulding ML. 1993. Flushing times for the Providence River based on tracer experiments. *Estuaries*, 16:830-839.
- Atkinson LP, Blanton JO, Haines EB. 1978. Shelf flushing rates based on the distribution of salinity and freshwater in the Georgia Bight. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 7:465-472.
- Bolin B, Rodhe H. 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, 25:58-62.
- Christian RR, Boyer JN, Stanley DW. 1991. Multi-year distribution patterns of nutrients within the Neuse River estuary,

- North Carolina. *Marine Ecology Progress Series* ,**71** :259–274.
- Dyer KR. 1973. *Estuaries : A Physical Introduction*. New York : John Wiley and Sons.
- Eyre BD. 2000. Regional evaluation of nutrient transformation and phytoplankton growth in nine river-dominated sub-tropical east Australian estuaries. *Marine Ecology Progress Series* ,**205** :61–83.
- Feng JL , Zhang W. 1998. The evolution of the modern Luanhe River delta , north China. *Geomorphology* ,**25** :269–278.
- Hagy JD , Boynton WR , Sanford LP. 2000. Estimation of net physical transport and hydraulic residence times for a coastal plain estuary using box models. *Estuaries* ,**23** :328–340.
- Huang DJ , Su JL , Backhaus JO. 1999. Modelling the seasonal thermal stratification and baroclinic circulation in the Bohai Sea. *Continental Shelf Research* ,**19** :1485–1505.
- Jay DA , Uncles RJ , Largier J , *et al.* 1997. A review of recent developments in estuarine scalar flux estimation. *Estuaries* ,**20** :262–280.
- Lin CL , Su JL , Xu BR , *et al.* 2001. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem. *Progress in Oceanography* ,**49** :7–19.
- Liu WC , Chen WB , Kuo JT. 2008. Modeling residence time response to freshwater discharge in a mesotidal estuary , Taiwan. *Journal of Marine Systems* ,**74** :295–314.
- Pilson MEQ. 1985. On the residence time of water in Narragansett Bay. *Estuaries* ,**8** :2–14.
- Sheldon JE , Alber M. 2002. A comparison of residence time calculations using simple compartment models of the Altamaha River estuary , Georgia. *Estuaries* ,**25** :1304–1317.
- Takeoka H. 1984. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research* ,**3** :311–326.
- Wang CF , Hsu MH , Kuo AY. 2004. Residence time of the Danshuei River estuary , Taiwan. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* ,**60** :381–393.
- Wang Q. 2008. Numerical Modeling of the Yellow River Plume and the Water Exchange between the Bohai Sea and the Yellow Sea (PhD Thesis). Japan : Ehime University.
- Yanagi T. 1999. Seasonal variations in nutrient budgets of Hakata Bay , Japan. *Journal of Oceanography* ,**55** :439–448.
-
- 作者简介 王海燕 女 ,1986年生 硕士研究生。主要从事海洋环境动力学方面的研究。E-mail : hwhy31@ yahoo. com. cn
- 责任编辑 魏中青
-