

长江口北支盐水倒灌南支对青草沙 水源地的影响*

茅志昌 沈焕庭 肖成猷

(河口海岸国家重点实验室,华东师范大学河口海岸研究所 上海 200062)

提要 自 1978 年以来,在长江口的几个关键岸段(例青龙港、新建、高桥、堡镇等)设置盐度观测站;1992—1994 年的枯季,在青草沙水源地的南、北两侧各抛测量船一艘,在一个完整的大、中、小潮期间,连续逐时观测流速、流向、水深、盐度等,同时在青龙港等处设置 6 个岸边观测点同步取样;1995—1996 年在船站位置各设置氟离子自动监测仪一台;1996 年 3 月又进行了一次大规模的长江口水文测验。本文对大量的现场资料作了分析计算。研究结果表明,青草沙水源地盐水来源主要有北支倒灌咸水团和外海咸水入侵。前者的特征为,氟度的半月变化是小潮期(或小潮后的寻常潮)的氟度反高于大潮期,氟度的潮周日变化是日最高值出现在落憩附近,日最低值出现在涨憩附近,氟度的垂向分层不明显。这与外海盐水入侵引起的氟离子浓度在半月和潮周日内的变化特性正好相反。

关键词 盐水入侵源,氟度,长江口

中图分类号 P941.77

随着上海城市和经济的飞速发展,工业和生活用水量不断增加。上海虽濒江临海,但却为缺乏洁净淡水资源而困扰,上海已被国家有关部门确定为水质型缺水城市。寻找新的优质水源,势在必行。

长兴岛西部及其南北两侧有大片滩地可资利用,且受长江口南岸西区、东区和黄浦江的排污影响小,水质良好,是个理想的水源地。但其距长江口门近,枯季受外海盐水入侵的机率和强度要比宝钢河段高许多。关于长江口咸潮入侵问题曾引起不少研究人员的重视和兴趣(沈焕庭等,1980;韩乃斌,1983;杨桂山等,1993;徐建益等,1994;胡方西等,1996),但北支倒灌盐水对南、北港上段水域的影响程度如何等问题,尚未有人涉足,在水库建造之前,必须加以可行性研究。本文在分析历史资料及 1992 年以来在青草沙水域的实测数据基础上,对此进行了较为系统的探讨。研究成果可为青草沙水域建造大型避咸蓄淡水库提供科学依据。

1 研究区域与现场观测

1.1 研究区域

长兴岛为上海市第二大岛,其西北面有大片潮滩,部分已出露水面,称青草沙,其西端

* 国家自然科学基金重点资助项目,49736220。茅志昌,男,出生于 1949 年 7 月,副研究员,E-mail: htshen@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期:1999-10-08,收修改稿日期:2000-06-31

为中央沙,长兴岛南面有一狭长潮滩,谓瑞丰沙嘴或南小沙。青草沙水源地泛指长兴岛西部的中央沙、南小沙、青草沙及其附近水域,总面积约为 40km²,位于南、北港上段(图 1)。

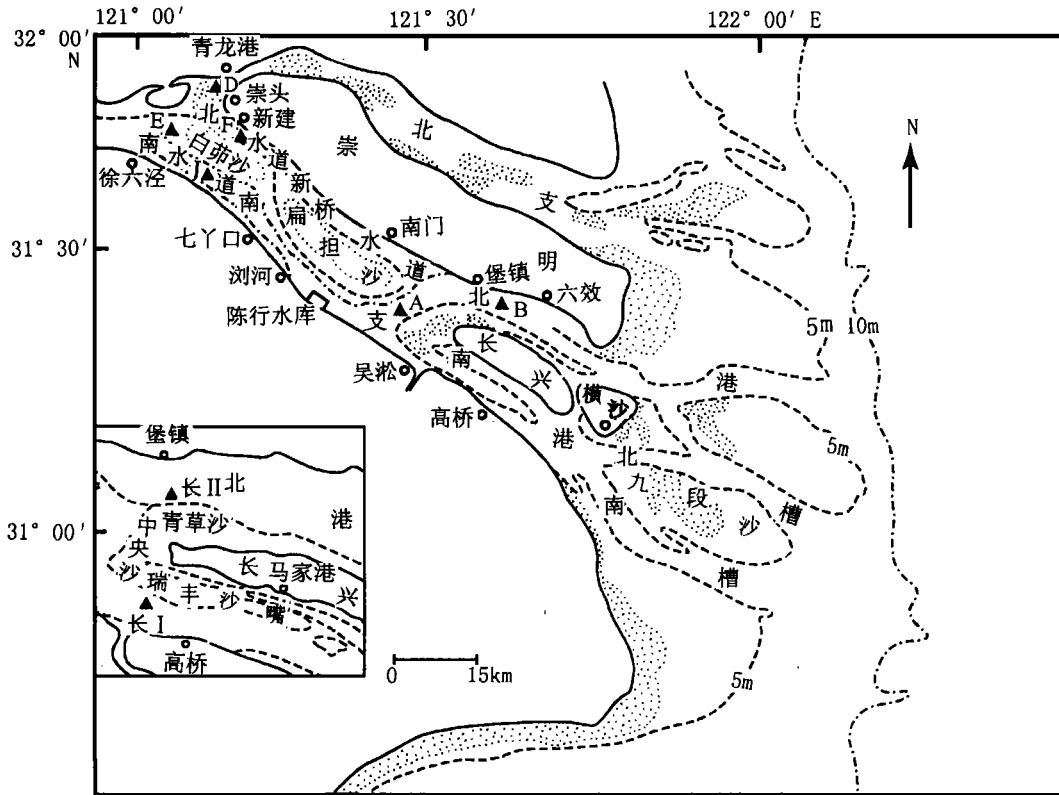


图 1 长江河口测站

Fig. 1 Location of the stations in Changjiang River Estuary

○ 岸边测站 (Stations on bank); ▲ 船测站 (The position of the boats measurement)

1.2 现场观测

由于以往青草沙水源地的实测盐度数据极少,故现场资料观测成为研究工作头等重要的事情。早在 1991 年,作者就在高桥、堡镇、青龙港等地设置 7 个岸边观测点;1992—1994 年的枯季,分别在瑞丰沙嘴南侧(长 I)和青草沙北侧(长 II)各抛测量船一艘,昼夜逐时连续观测一个完整的大、中、小潮期间的流速、流向、水深及盐度等,同时在长江河口的关键岸段青龙港、高桥、堡镇等处设置了 6 个观测点,与测量船同步取样;另外,自 1995—1996 年,在长 I、长 II 处各抛氯离子自动监测仪一台,每隔半小时记录一个氯度值;1996 年 3 月又进行了一次大规模的长江口水文测验,范围为东径 121°10'56"—122°35'30"、北纬 30°50'30"—31°50'54",纵向跨度约为 170km,测区内共布设水位站 16 处,岸边盐度测站 11 处,水域共布设测点垂线 19 条,动用测量船 10 艘,船只观测历时 10 天,岸

边测站历时 17 天,获取了大量第一手资料,为研究工作打下了良好的基础。

2 研究结果

2.1 北支盐水倒灌南支的机理

18 世纪之前,北支曾是长江主泓所在;18 世纪后,长江主泓改走南支入海,北支逐渐缩窄变浅。本世纪 50 年代末开始,北支泄流功能进一步衰退,出现水、沙、盐倒灌南支的现象。

从 50 年代到 70 年代,南支与北支的交汇处地形发生了重大变化,60 年代初,江苏海门江心沙围垦,崇明西南角的老白茆沙也在 1971 年冬并岸围垦。上游径流进入北支的角度进一步加大,与主流约成 90° 交角,水流受阻,促使北支进一步淤浅缩窄,河床阻力加大,潮波变形加剧,青龙港低潮位出现在落憩附近,高潮位出现在涨憩前 2h 左右,接近于驻波型。南支—南支的潮波还保持着前进波的特点,属以前进波为主的变态潮波(沈焕庭等,1988)。

南、北支不同的地形和潮波运动形式导致了青龙港河段与南支白茆沙河段的水位差,北支的高潮位高于南支的高潮位,北支的低潮位低于南支的低潮位。多次水文测验资料表明,在北支上首处于落潮后期水位较低时,南支已经涨潮,水位高于北支,水流自南向北进入北支,随着北支水流从落潮转为涨潮,北支高潮位高于南支潮水位时,北支涨潮流倒灌入南支。70 年代是北支盐水倒灌南支最为严重的时期,据计算,1974 年倒灌盐量达 $2.0 \times 10^8 \text{t}$ (韩乃斌等,1984),造成南支水质的自然污染。

北支盐水倒灌南支主要发生在枯季的大潮期,根据韩乃斌等(1986)¹⁾以往的实测资料和相关计算的成果,当大通站流量小于 $2.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$ 、青龙港潮差大于 2.5m 的条件下,北支盐水开始倒灌南支。据近几年的资料²⁾分析,若大通月平均流量在 $1.6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$ 以下,北支盐水在大潮期明显倒灌南支;当大通流量在 $1.0 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$ 左右或连续低于 $1.0 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$ 时,北支倒灌盐水对青草沙水源地水质有明显影响,如 1987 年 2 月 16—17 日,倒灌盐量为 $1.48 \times 10^6 \text{t}$ 。

2.2 倒灌途径

北支倒灌南支的盐水,主要以咸水团形式随南支落潮流下泄,而随涨潮流上溯的甚少,故北支倒灌的盐水对上游徐六泾的影响很小。如 1987 年 2 月 16—17 日,在南北支分汊口布置了 4 个测站,在其相对水深 z/H (H 为水深)0.8m 处的氯度值,崇头(D 测站)高达 10 880mg/L,与 D 测站较近偏南的 E 测站为 445mg/L,D 测站下游新建断面 F 测站为 876mg/L,与 F 测站同一断面,位于白茆沙南水道的 J 测站为 792mg/L,而徐六泾仅为 10mg/L³⁾。随落潮流下泄的咸水主体通过白茆沙北水道进入南支,至新建水闸附近分成三路:一路沿崇明南岸进入新桥水道,其影响达庙港、南门、甚至可及堡镇水域。表 1 反映了崇明南岸水域在不同潮型下,氯度纵向分布具有两种不同的形式。大潮期,2#(位于白茆沙北水道,与 F 测站接近)、南门、堡镇、六效的氯度呈高一低—高的下凹型分布,小潮

1) 韩乃斌,卢中一,1986. 长江口分汊水道盐水入侵的特性. 南京水利科学研究所

2) 沈焕庭,茅志昌,肖成猷等,1996. 青草沙水源地盐水入侵规律研究. 河口海岸国家重点实验室

3) 黄觉新等,1988. 长江口南支(徐六泾—宝钢水库)水域盐水入侵规律研究. 水电部上海勘测设计院

期呈低—高一低的上凸型分布。另一路随主流进入七丫口河段,因该河段落潮流占明显优势,倒灌咸水净向下游移动,先影响宝钢水域,进而影响青草沙水源地。还有一路漫过白茆沙体进入白茆沙南水道,对白茆、钱泾、浪港等河段有一定影响(茅志昌等,1993)。

表 1 1996 年 3 月崇明南岸氯度(mg/L)纵向分布

Tab.1 Longitudinal distribution of chlorinity (mg/L) along south bank of Chongming Island, March 1996

测站	2#	南门	堡镇	六效
大潮	1242	400	837	1338
小潮	79	488	551	427

2.3 涨潮槽盐水入侵特性

1915 年,北支下泄径流量占南、北支总量的 25%,50 年代进入北支的径流量锐减,1959 年 8 月 20—21 日对两个潮周期的观测结果表明,北支占总径流量为 -2.3%,出现流量净进的现象。到了枯季,北支由涨潮流控制,大潮期盐度高于小潮期,盐度与潮位的变化趋势相似,盐度峰、谷值出现时间分别迟后于高潮位与低潮位 2h 左右,我们称之为“盐度滞后效应”。通过对北支青龙港测站枯季大潮期流速与盐度过程线的分析,发现北支上首河段落潮转涨潮的间隙时间很短,涨潮流速在短时间内很快达到最大值,盐度值随之上升,盐度峰值出现在涨憩附近,谷值出现在落憩附近。涨潮期间,盐度垂向分布均匀,落潮期间,分层明显,这是因为青龙港河段水浅,涨潮流强,落潮期间流速相对小的缘故。

表 2 为长兴测站的氯度特征值统计。长兴测站位于长兴岛马家港以东约 300m 的长兴涨潮槽内。长兴岛南部的瑞丰沙嘴原为中央沙部分泥沙受落潮流顶冲下移形成,在长兴岛与瑞丰沙嘴之间形成一条水深为 13—15m、槽宽 1000m 左右的涨潮槽,其上首与中央沙相连,阻碍了上游径流的注入,其氯度在半月中的变化规律与北支相似。

表 2 1999 年 1 月 17 日—2 月 10 日长兴测站氯度(mg/L)特征值统计

Tab.2 Statistics of characteristic values of chlorinity (mg/L) at station Changxing from 17 Jan. to 10 Feb. 1999

特征值	1 月份						2 月份					
	大潮			小潮			大潮			小潮		
	17	18	19	23	24	25	1	2	3	8	9	10
日最高值	5000	4600	4650	4900	3600	3800	3250	3500	2300	1200	1400	1800
日最低值	2200	2300	2000	1900	1500	1900	1500	1200	1000	900	900	1000
日平均值	3400	3500	3200	2800	2700	2800	2200	2300	1600	1000	1000	1300

杭州湾为世界著名的强潮河口湾,与巨大的进潮量相比,径流量极小。据胡方西等(1985)¹⁾对杭州湾的研究发现,日平均盐度是大潮高、小潮低。

1) 胡方西,潘定安,严肃庄等,1985. 杭州湾盐度变化的基本特征. 上海市海岸带和海涂资源综合调查论文选编(第三集) .

2.4 北支倒灌咸水团过境特性

北支高盐水进入南支后,由于南支白茆沙河段受涨潮流的顶托,倒灌盐水滞留于南北支分叉处约 $3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的河槽中,在涨落潮流的掺混、稀释及扩散作用下,形成一股氯度浓度空间分布均匀的咸水团,如果北支盐水不断进入南支,咸水团的强度将不断增加。咸水团在落潮优势流作用下,经南支、南、北港、南、北槽下移出海,直至其周围氯度与咸水团氯度相近,咸水团自动消失为止。咸水团到达宝钢河段需 3—5d,到达青草沙水域需 5—8d。

由表 3 可以看出,宝钢河段的高氯度值出现在小潮期,大潮期氯度相对很低(表 3)。表 3 说明了两个问题,其一,宝钢河段的氯度值在大小潮期间的反差特别显著,小潮期氯

表 3 1987 年 2 月宝钢水库取水口处氯度 (mg/L) 特征值统计

Tab.3 Statistics of characteristic values of chlorinity (mg/L) at water intake of Baogang reservoir Feb. 1987

特征值	大 潮 期 (d)			小 潮 期 (d)		
	13	14	15	20	21	22
日最高值	115	122	84	1337	1492	1445
日最低值	62	48	61	701	976	1286
日平均值	89	75	74	999	1311	1368

注:大、小潮单位“d”表示“日”

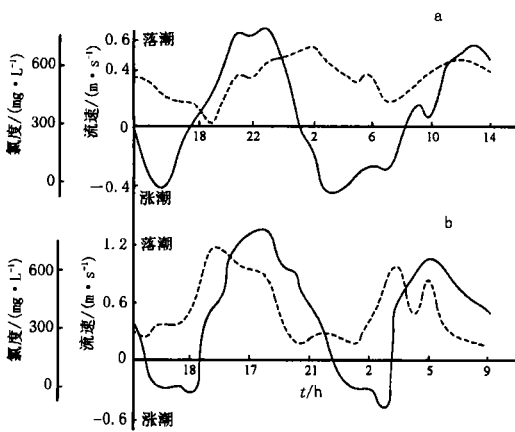


图 2 1993 年长 II 测站流速、氯度过程线

Fig. 2 Variation in current velocity and chlorinity at station Ch II in 1993

a. 小潮 (Neap tide), b. 大潮 (Spring tide);
 --- 氯度 (Chlorinity); —— 流速 (Velocity)

度日均值为大潮期的 11—18 倍,这在以外海盐水入侵源为主的涨潮槽(或强潮河口)中绝不可能出现;其二,氯度值在一个潮周日内的变幅较小,水库投机取水的机率也小(宝钢总厂对氯度有严格的要求,最高值不能超过 200mg/L,平均值要小于 50mg/L),在一昼夜中,或者是全天可以开泵引长江水,或者全天不能引水。

图 2 为位于青草沙北侧的长 II 站在大、小潮期间的流速与氯度过程线,大潮期,高氯度值出现在涨憩附近,低值出现在落憩附近;到了小潮期,低氯度值出现在涨憩附近,高值出现在落憩附近。

2.5 青草沙水域测站咸潮入侵强度比较

据高桥、吴淞、长 I、长 II 和堡镇等 5 个测站在 1992—1996 年枯水期间的观测资料

分析,高桥与长 I、长 II 站的氯度变化趋势最为相似,氯度量值也比较接近,吴淞站氯度值最低,约为长 I 测站的一半,堡镇站因受北支倒灌及北港涨潮槽的影响较强,盐水入侵强度大于其它测站(表 4)。

表 4 1993 年 2 月 14—23 日青草沙水域咸潮入侵强度统计

Tab.4 Statistics of strength of saltwater intrusion in Qingcaosha water area from 14 to 23 Feb. 1993

测站	最高日均值 (mg/L)	最低日均值 (mg/L)	$T_1/T_0^{1)}$ (%)	>250mg/L 天数(d)	>800mg/L 天数(d)
长 I	789	291	92	9	1
高桥	665	112	82	8	1
吴淞	431	138	54	2	0
长 II	846	261	90	8	1
堡镇	1161	492	100	10	7

1) T_1 、 T_0 分别为 >250mg/L 的小时数及总的观测小时数

2.6 北支倒灌咸水团对青草沙水源地的影响

通过近几年长兴岛西部南北两侧水域的氯度观测,反映了北支倒灌盐水是青草沙水源地氯离子的主要来源。图 3 是根据作者 1996 年获取的资料绘制。大潮期,位于新桥通道上口的 A 测站与陈行水库取水口处的氯度很接近,量值较低,只有 100mg/L 左右,而长 I、堡镇、六效的氯度远比上二站高,说明在大潮期,从南支主槽经新桥通道进入北港的水体尚未受倒灌盐水影响。同时图 3 还反映了大潮期,南、北港受外海咸水上溯影响非常明显,六效站因位于崇明南岸东部的涨潮槽,氯度高于位于南港上段的长 I 站,六效与长 I 站的氯度值在一个潮周日内出现大起大落现象,最大周日变幅分别达 2.6、2.3,氯度高值出现在涨潮期,低值出现在落潮期。小潮期, A 测站与陈行水库取水口处的氯度也很接近,但量值高达 800mg/L 左右,反高于六效、长 I 等测站,且氯度的潮周日变幅很小,表明北支倒灌盐水已影响南支河段,但咸水团尚未到达南、北港。

B 站位于与长 II 相近的北港落潮主槽内。该站在 1996 年 3 月 9—10 日(农历廿一廿一)的流速、氯度变化过程(图 4)显示,氯度垂向分层明显,两个氯度峰值均出现在涨憩时刻,而在 11 日(农历廿二),两个氯度峰值均出现在落憩时刻,且氯度垂向分布均匀,表明氯离子不是由涨潮流带来,而是来自上游方向的落潮流。这说明,在大潮期以及大潮后的寻常潮期间,北港上段仍受到来自北港口外的外海盐水入侵影响,北支倒灌咸水团到达青草沙水源地是在小潮期,有时在小潮后的寻常潮期间。造成这一现象的原因可能与上游径流量的丰枯、北支倒灌盐水量多少及持续时间的长短有关。

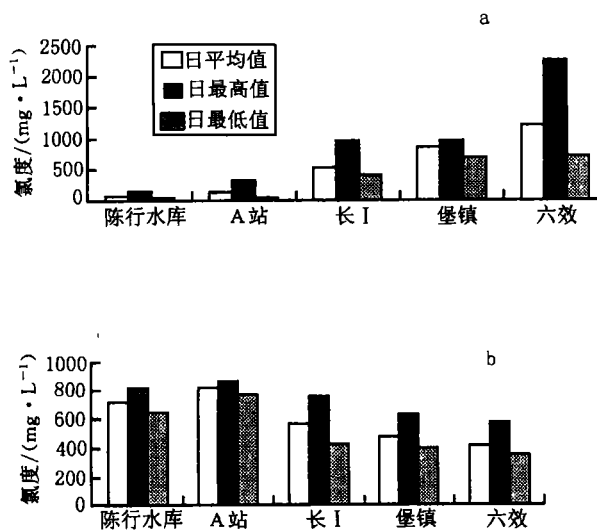


图 3 长江口各测站氯度的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variations in chlorinity at stations in the Changjiang River Estuary
a. 大潮(Spring tide), b. 小潮(Neap tide)

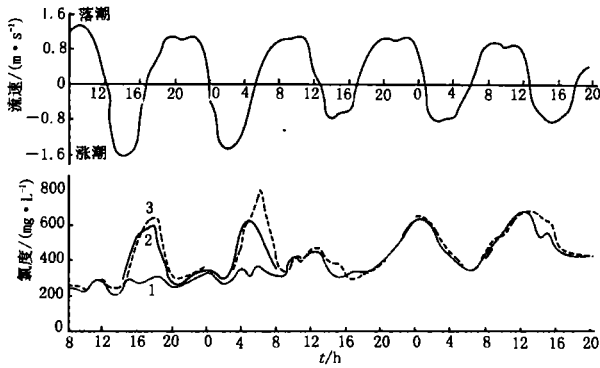


图4 B测站流速、氯度过程线(1996/03/09—11)

Fig. 4 Variation of current velocity and chlorinity at station B (from 09/03/1996, to 11)
1 表层(Surface), 2 中层(Middle), 3 底层(Bottom)

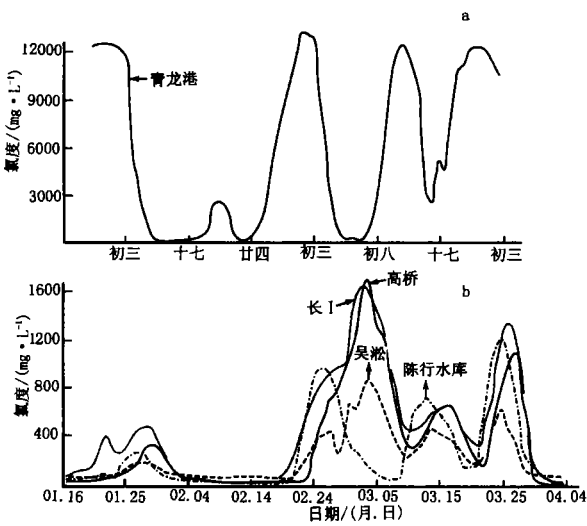


图5 测站青龙港、陈行水库、高桥、长 I、吴淞的氯度过程线(1996.01.16—1996.04.04)

Fig. 5 Variation in chlorinity at stations Qinglonggang, Chenhang reservoir, Gaoqiao, Ch I, Wusong (from 01.16.1996 to 04.04.1996)

图5根据1996年1月16日—4月4日,青龙港等5个测站的同步观测资料绘制。从氯度峰谷值出现的时间看,青龙港的高氯度区出现在大潮期,低氯度区出现在小潮期,陈行水库取水口四个氯度峰,均出现在小潮期,高桥、长 I 站的氯度峰出现在小潮后的寻常潮。北支上首青龙港河段与南支、南、北港上段出现氯度峰谷值的位相差近 90°,同时作者还看到,1月中旬,青龙港氯度高达 12 000mg/L,但陈行水库取水口处的氯度峰值仅为 300mg/L,说明南支河段氯度的升高需要一个积聚的过程。从氯度峰的强度看,高桥、长 I 站在 2月下旬至3月初的峰值约为陈行水库的 2 倍,说明宝钢河段的盐水主要来自北支倒灌,青草沙水源地的盐

水来自北支倒灌和外海直接入侵,氯度相对比较高。进入 3月下旬,下泄流量增加,进入北支的流量也相应加大,遏制了北支盐水倒灌,滞留在南支河段的咸水团随落潮流向海净位移。从图 5 看出,从陈行水库到长 I、高桥这一广大水域为咸水团控制,3月下旬咸水团过境青草沙水源地后,整个枯季的盐水入侵过程结束。

2.7 青草沙水源地盐水入侵源的判别

青草沙水源地盐水入侵源有外海盐水直接入侵和北支倒灌两类,两者具有明显的特征。在一个潮周日内,若盐度峰、谷值分别出现在落憩、涨憩附近,且氯度垂向分层不明

显,则盐水来自北支;如氯度峰、谷值分别出现在涨憩、落憩附近、氯度垂向分层较为明显,则表明盐水来自外海的涨潮流;在半个月内,若氯度高值区出现在小潮期或小潮后的寻常潮,低值区出现在大潮期,则表明盐水来自北支倒灌,如盐水来自外海,低氯度区与高氯度区分别出现在小潮期和大潮期或稍后几天内。

据对高桥站 1974—1997 年的氯度资料分析,约有 60% 的盐水入侵过程主要来自北支倒灌过境咸水团,30% 的盐水入侵过程来自外海,10% 的盐水为上述两种入侵源兼而有之,其表现特点是高氯度值在大潮期出现后一直持续到小潮期。

3 结语

3.1 青草沙水源地的氯度来自外海盐水入侵和北支咸水倒灌,并以受北支倒灌咸水团过境作用为主。

根据氯度与流速的位相、氯度高值区、低值区与大小潮型的关系以及氯度垂向分布等特点,可以判别青草沙水源地的盐水来源。

3.2 北支盐水倒灌南支有害无益,它是南支及青草沙水源地盐水的—个主要来源,是长江口淡水资源充分利用、解决上海城市用水的主要障碍。采取工程措施综合治理北支,减少直至杜绝盐水倒灌,能有效地改善南支水质,对宝钢、陈行水库和在研究中的青草沙水库大有裨益,可大幅度降低南支及青草沙水源地的氯离子浓度,缩短最长连续不宜取水天数,节省大量工程投资,并在一定程度上缓和因南水北调工程实施和北槽深水航道开挖后,长江口盐水入侵加重对水质造成的不利影响。

参 考 文 献

- 沈焕庭,茅志昌,谷国传,徐彭令,1980. 长江河口盐水入侵的初步研究——兼谈南水北调. 人民长江,3:20—26
- 沈焕庭,谷国传,李九发,1988. 长江口潮波特性及其对河槽演变的影响. 见:陈吉余,沈焕庭,恽才兴等编. 长江河口动力过程和地貌演变. 上海:上海科学技术出版社,73—79
- 杨桂山,朱季文,1993. 全球海平面上升对长江口盐水入侵的影响研究. 中国科学(B辑),23(1):69—76
- 茅志昌,沈焕庭,姚运达,1993. 长江口南支南岸水域盐水入侵来源分析. 海洋通报,12(3):17—25
- 茅志昌,1995. 长江河口盐水入侵锋研究. 海洋与湖沼,26(6):643—649
- 胡方西,胡 辉,谷国传,1996. 长江河口盐水入侵锋研究. 海洋与湖沼,26(5,增刊):23—31
- 徐建益,袁建忠,1994. 长江口南支河段盐水入侵规律的研究. 水文,83(5):1—6
- 韩乃斌,1983. 长江口南支河段氯度变化分析. 水利水运科学研究,1:74—81
- 韩乃斌,卢中一,1984. 长江口北支演变及治理的探讨. 人民长江,3:40—45

SALTWATER INTRUSION PATTERNS IN THE QINGCAOSHA AREA CHANGJIANG RIVER ESTUARY

MAO Zhi-Chang, SHEN Huan-Ting, XIAO Cheng-You

(*State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, 200062*)

Abstract There are two sources of saltwater intrusion in Qingcaosha waters, one directly from the outer sea and the other from North Branch, with the latter being dominant. During a tidal cycle, if peaks of chlorinity occur around the flood slack and the troughs are near the ebb slack, then vertical distribution of the chloride content is relatively unhomogeneous, indicating that saltwater intrusion is from the outer sea; likewise, if the peaks and troughs of the chloride content occur at the ebb slack and the flood slack then vertical distribution of the chloride content is relatively homogeneous, indicating saltwater intrusion from North Branch to South Branch. In the Changjiang River Estuary, during a spring-neap cycle, if high chloride values occur on the spring tide and a low chloride zone occurs on the neap tide, then the saltwater comes from the outer sea. If the zone of high chloride values occurs on neaps and the low zone occurs on springs then the saltwater comes from North Branch into South Branch.

The patterns and values of the chloride variation at Gaoqiao station are similar to that at CH I and CH II stations mostly compared with other stations in the waters of Qingcaosha. Based on the field observations from 1974 to 1997 at Gaoqiao station, the period with saltwater mass return from North Branch accounts for about 60%. Direct intrusion from outer sea accounts for about 30%, the remaining period undergoes mixed effects by the above two sources. We suggest that comprehensive regulation of North Branch should be carried out, in order to reduce and even prevent saltwater intrusion from North Branch into South Branch.

Key words Sources of saltwater intrusion, Chlorinity, Changjiang River Estuary