

全球海平面上升对长江口盐水入侵的影响研究*

杨桂山 朱季文

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要

本文采用经验相关和两维氯度沿程分布数值模拟计算的方法, 结合长江口地区供水实际情况, 就下一世纪长江口海平面上升 0.5—1.0 m 对吴淞口枯季逐时含氯度大于 100×10^{-6} , 200×10^{-6} 和 250×10^{-6} 的机率、南支河段枯季落憩 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线的入侵距离以及在出现长江特枯水年最小月均流量的最不利情况下, 南支河段氯度沿程分布的影响进行了分析和计算。

关键词 全球海平面上升、盐水入侵、氯度、等盐度线

入海河口是河流与海洋的交汇地带, 河流径流与海洋潮汐两种动力互相作用、相互消长, 决定了河口的咸淡水平衡, 其中任一动力发生变化都将导致盐水入侵强度的改变。气候变暖引起的全球性海平面上升问题已成为全球变化研究的热点之一, 海平面上升将给沿海地带的生态环境产生重大影响。目前对海平面上升加剧的海岸侵蚀、湿地淹没和风暴潮灾害已有较多的研究, 而海平面上升对河口盐水入侵的影响研究成果尚不多见。在美国, Delaware 河流域委员会曾对海平面上升引起的该河河口盐水入侵强度的变化进行过较详细的研究^[1,2]。在荷兰, 据国家公共工程部门估算, 未来海平面上升 1.0 m, 该国为适应盐水入侵强度增加而调整供水系统就需耗资数十亿美元^[3]。由于长江口是盐淡水的混合型河口^[4,5], 要全面地分析研究盐水入侵范围内氯度沿程分布随时间的变化十分困难, 目前只能利用连续方程、分散方程, 再结合潮汐运动周期性变化特点, 按准稳定情形进行近似分析和计算。长江口南支河段是长江口地区的主要供水水源地, 其水质好坏, 直接影响该地区社会经济发展和人民生活。研究海平面上升对南支河段盐水入侵的影响, 可为合理开发长江口水资源提供依据。

1 长江口盐水入侵现状分析

长江口是一个丰水多沙、中等潮汐强度、有规律分汊的三角洲河口(图1)。河口多年平均入海流量约 $29 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中 6—9 月份的洪季, 各月平均下泄流量均在 $39 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上; 12—3 月份的枯季, 各月平均流量仅 $10—15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右; 其余四个月为洪、枯水交替

1991-10-25 收稿, 1992-03-23 收修改稿。

* 国家自然科学基金和中国科学院基金联合资助项目。

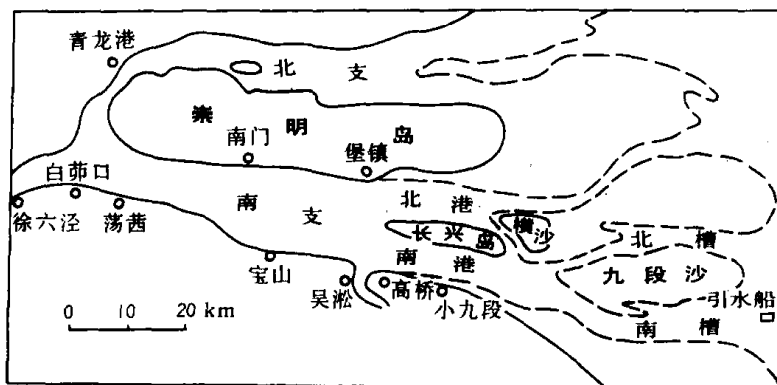


图1 长江河口示意图

季节,各月平均流量介于 $23 - 33 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间。

长江口潮汐为不规则半日潮,在一个太阴日内有潮高不等的两次高潮和两次低潮。由于河口水域辽阔,河宽收缩缓慢,因而潮波变形不甚明显。受河流与海洋两种动力作用不同组合的影响,河口盐淡水混合程度也有所不同,枯季大潮期,径流作用弱而潮流作用强,河口盐淡水混合强烈,垂向盐度差很小,属强混合型;枯季平潮、小潮期以及其他季节,盐度线则以楔状伸向上游,表底层之间存在明显的盐度相对变化带,为缓混合型;只有在洪季遇特别小的潮差时,盐、淡水混合才出现高度成层型。因此就全年而言,长江口盐、淡水混合则以缓混合型为主^[4,5],为盐、淡水混合型河口。

对长江口盐水入侵强度变化起决定作用的主要是长江下泄流量和河口潮汐两个因素,此外,口外海水含盐度、河口地形和河床阻力、沿海海流以及风力与风向等,对其也有一定的影响,长江流量的季节性变化和河口潮汐的周期性运动,使长江口盐水入侵变化有一定的规律性。

长江下泄入海流量是控制长江口盐水入侵强度的主导因素。在长江洪季,径流十分丰富,长江口河段基本为淡水所控制,吴淞口多年日均氯度大于 100×10^{-6} 的机率不足 1%;而在长江枯季,径流作用显著减弱,潮汐作用相对增强,盐水入侵较为严重,吴淞口多年日均氯度大于 100×10^{-6} 的机率可达 40% 以上。受潮位周期性升降的影响,河口水体含氯度也随之变化。一般年份,氯度与潮位过程线之间具有较好的相似性,只是氯度变化滞后于潮位的变化,两者之间存在一定的相位差(图 2)。而在长江丰水年份($P=20\%$),较强的径流作用则使氯度月

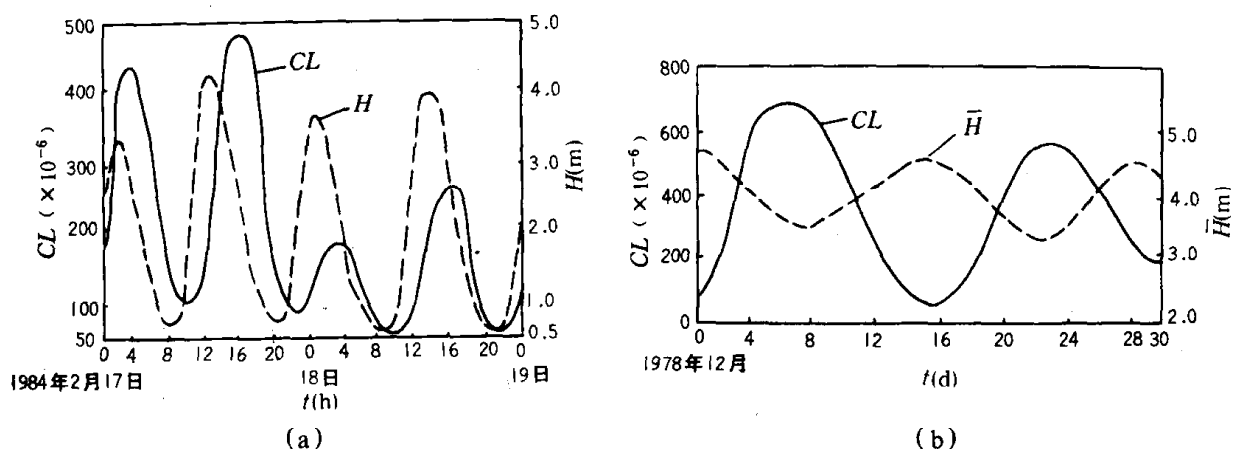


图2 高桥站逐时氯度与潮位过程线(a)和吴淞站逐日氯度与平均高潮位过程线(b)

变化与潮位变化之间的对应关系不明显。

由于南北支河段的断面形态、分流量及潮波特性不同,因而其盐水运移和氯度分布也各有不同的特点。北支河段分流量小,潮流作用强,其总体盐水入侵强度远大于南支河段,氯度分布从上游至口门沿程递增,枯季大潮期,甚至有盐水以水体交换的形式,从北支倒灌进入南支。南支则是长江排泄径流的主要通道,总体盐水入侵强度虽没有北支严重,但由于同时受外海盐水经南北港直接入侵和北支盐水倒灌两个方向盐水的影响,整个河段氯度分布比较复杂。枯季大潮期,受北支盐水倒灌的影响,七丫口至吴淞口河段氯度出现从上游至下游沿程递减的反常分布,整个南支河段氯度呈高一低一高的特殊分布形式;小潮期间,北支倒灌影响不明显,氯度则恢复沿程递增的正常分布。

2 海平面上升对盐水入侵强度的影响

人类活动中大量矿物燃料(煤、石油和天然气)和有机生物体的燃烧以及破坏森林和改变土地利用方式等,使近百年来大气中CO₂,CH₄,N₂O,CFCs等微量气体含量急剧增加,大气温室效应增强,气温升高,从而引起海洋表层(0—100 m)海水受热膨胀、大陆高山冰川融化退缩以及极地冰盖(格陵兰与南极洲冰盖)的加积与消蚀比例的变化,导致全球性的海平面上升。在过去百年间,气候变暖已引起全球海平面上升10—15 cm^[6]。大量证据表明,随着气候进一步变暖,未来全球海平面仍将持续上升。然而,由于预测过程中存在许多不确定性,因此,要确切地估算下一世纪全球海平面上升量仍十分困难,不同研究者得出的结论差异很大(表1)^[6-8]。

表1 下一世纪全球海平面上升量估算(cm)

研究 者及年份	方 案	2025 年		2050 年		2100 年	
		低	高	低	高	低	高
Gornitz	(1982)			40	60		
Hoffman 等	(1983)	13	55	24	117	56	345
Thomas	(1986)					60	230
Hoffman 等	(1986)	10	21	20	55	58	367
Jaeger	(1988)	-4	52	-7	138		
Oerlemans	(1989)	0	40	33	65	66	122

长江口地区自第四纪以来,地壳运动以垂直沉降运动为主,近期 平均沉降速率约1—3 mm/a,属大地构造沉降区。同时,该地区又是我国城市(上海市)抽取地下水引起地面下沉最严重的区域之一,在吴淞口,地面平均沉降速率达4.1 mm/a^[9]。因而,下一世纪长江口的相对海平面上升幅度可能超过全球平均值。本研究综合有关全球海平面变化的研究成果,结合长江口地的地面沉降趋势,采用到下一世纪中叶(2050年前后)长江口海平面上升0.5,0.8和1.0 m 三个幅度来估算其对南支盐水入侵的可能影响。

2.1 吴淞口枯季不同氯度值出现机率的变化

根据一般供水标准,结合长江口地区用水的实际情况,选取水体含氯度达到100×10⁻⁶作为河口盐水入侵的标志,200×10⁻⁶作为一般工业供水的氯度上限,250×10⁻⁶为居民生活用水的氯度控制标准。统计每年枯季吴淞口逐时含氯度大于上述三个特征氯度值的持续时间,并

与同期大通站平均流量和吴淞站平均高潮位之间进行经验相关分析,得如下相关关系(相关系数均在 0.94 以上):

$$P_{100} = 7.2 \times 10^{-2} [\bar{H}/(L^{0.4}Q_m)]^3, \quad (1)$$

$$P_{200} = 5.6 \times 10^{-3} \exp [2.10\bar{H}/(L^{0.4}Q_m)], \quad (2)$$

$$P_{250} = 2.9 \times 10^{-3} \exp [2.38\bar{H}/(L^{0.4}Q_m)], \quad (3)$$

式中, P_n 分别为吴淞口枯季逐时含氯度大于 100×10^{-6} , 200×10^{-6} 和 250×10^{-6} 的机率(%); $\bar{H}$ 为吴淞站枯季平均高潮位(m), 计算中取 1960—1986 年枯季月均高潮位的平均值 3.0 m 代表现状平均高潮位值; L 为与北支盐水倒灌南支强度有关的地形参数, 计算中取南北支分汉口附近 ($121^{\circ}05' E$)—10 m 等深线的长度(km); $Q_m = Q_i/\bar{Q}$, Q_i 为大通站枯季平均流量, 变幅在 $9—16 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间, 基本能反映长江枯季流量变化情况, $\bar{Q}$ 为大通站多年枯季平均流量, 计算中取值 $13250 \text{ m}^3/\text{s}$.

假定 L 值变化与相应年份大通站平均流量之间的对应关系不变, 根据(1)—(3)式计算可知, 当长江下泄流量不足 $10 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 或流量达 $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 海平面上升超过 0.8 m 时, 海平面上升将导致枯季吴淞口逐时含氯度大于上述三个特征氯度值的机率达 100%. 当长江下泄流量达 $13 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 海平面上升 0.5 m, 吴淞口各氯度值出现的机率变化相对较小; 但当海平面上升超过 0.8 m 时, 可导致枯季吴淞口氯度大于上述三个特征值出现的机率分别比现状增加 1.1 倍、1.4 倍和 1.7 倍. 当长江下泄流量超过 $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 即使海平面上升 1.0 m, 吴淞口枯季逐时含氯度大于 100×10^{-6} 的机率也仅 18%, 大于 250×10^{-6} 的机率不足 8%, 海平面上升的影响甚微(表 2).

表 2 海平面上升对枯季吴淞口不同氯度值出现机率的影响(%)

$CL(\times 10^{-6})$	>100				>200				>250			
$\begin{matrix} H(m) \\ Q(m^3/s) \end{matrix}$	3.0	3.5	3.8	4.0	3.0	3.5	3.8	4.0	3.0	3.5	3.8	4.0
10000	86	100	100	100	68	100	100	100	66	100	100	100
11000	55	88	100	100	36	71	100	100	32	70	100	100
12000	41	65	83	96	24	44	64	83	20	41	62	82
13000	27	43	56	65	15	26	36	45	12	22	32	41
15000	8	12	16	18	5	7	9	10	3	5	6	8

2.2 南支河段落憩 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线入侵距离的变化

利用长江口 50 年代以来 10 多次大规模纵向水文测验资料, 统计分析 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线的入侵距离与吴淞站平均潮位和大通站平均流量之间的关系, 得如下相关关系(相关系数均达 0.90):

$$S_1 = 70.7 \log (H_m/Q_m) + 36.5, \quad (4)$$

$$S_2 = 57.8 \log (H_m/Q_m) + 29.6, \quad (5)$$

式中, S_1 和 S_2 分别为落憩 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线上溯距口门引水船的入侵距离(km); $H_m = H_i/H_0$, H_i 为观测期间吴淞站平均潮位(m), H_0 为吴淞站多年平均潮位, 计算中取 2.11 m,

并以此值代表现状平均潮位值; $Q_m = Q_i/Q_0$, Q_i 为观测前 7 天大通站日均流量 (m^3/s), 其变幅在 $7.8 - 48.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间, 能代表长江流量的洪枯水变化, Q_0 为大通站多年平均流量, 计算中取 $29.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

计算表明, 当海平面上升 0.5 m 时, 枯季南支落憩 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线入侵距离约分别比现状增加 6.5 km 和 5.3 km. 在长江下泄流量不足 $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 两等盐度线可分别上溯到高桥 (距引水船约 70 km) 和小九段 (距引水船约 59 km) 以上河段. 海平面上升 0.8 m 时, 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线入侵距离将分别比现状增加 9.8 和 8.1 km 左右, 在长江下泄流量保持在 $13 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 就可使两等盐度线上溯到高桥和小九段附近河段; 流量不足 $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 两者可分别上溯到吴淞口 (距引水船约 76 km) 和高桥以下 7.8 km 左右处. 当海平面上升达 1.0 m 时, 1×10^{-3} 和 5×10^{-3} 等盐度线入侵距离约分别比现状增加 11.9 km 和 9.7 km. 在长江下泄流量保持在 $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 两等盐度线就可分别入侵到高桥和小九段附近河段; 流量不足 $7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ (相当于长江特枯水年最小月均流量) 时, 1×10^{-3} 等盐度线可入侵至距宝山 (距引水船约 98 km) 5.7 km 左右的河段, 5×10^{-3} 等盐度线也将上溯到吴淞口附近河段 (表 3).

表 3 海平面上升对南支河段落憩时盐水入侵距离的影响 (km)

等盐度线	1×10^{-3}				5×10^{-3}			
$H(\text{m})$ $Q(\text{m}^3/\text{s})$	2.11	2.61	2.91	3.11	2.11	2.61	2.91	3.11
7000	80.4	86.9	90.2	92.3	65.2	70.8	73.5	75.2
9000	72.6	79.2	82.5	84.5	59.1	64.5	67.2	68.9
11000	66.5	73.1	76.3	78.4	54.1	59.4	62.2	63.8
13000	61.3	67.9	71.2	73.3	49.9	55.3	58.0	59.7
15000	57.0	63.5	66.8	68.9	46.3	51.7	54.4	56.1

2.3 对南支河段氯度纵向分布的影响

为研究海平面上升对南支盐水入侵沿程度变化的影响, 本研究应用 ADI 法建立了长江口的二维氯度分布数学模型¹⁾. 计算范围: 上至徐六泾 (距引水船约 144 km), 下至口门外约 -20 m 等深线, 实际计算时段为 1987 年 2 月 12—17 日大潮期, 该时段内大通站平均下泄流量约 $7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.3.1 数学模型 (1) 基本方程:

连续方程

$$\text{一维} \quad B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

$$\text{二维} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Hu) + \frac{\partial}{\partial y} (Hv) = 0. \quad (7)$$

运动方程

$$\text{一维} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + \theta \frac{\partial H}{\partial x} A + g \frac{\theta |\theta|}{AC_f^2 R_h} = 0, \quad (8)$$

1) 此项工作得到水利部南京水利科学院河港研究所韩乃斌同志的大力支持和帮助, 谨表谢忱.

$$\text{二维} \quad \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} - f v + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_f^2 H} = 0, & (9) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + f u + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_f^2 H} = 0. & (10) \end{cases}$$

氯度守恒方程

$$\text{二维} \quad \frac{\partial(CH)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uHC) + \frac{\partial}{\partial y}(vHC) = \frac{\partial}{\partial x}[(D_x H) \frac{\partial c}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y}[(D_y H) \frac{\partial c}{\partial y}]. \quad (11)$$

式中, x 和 y 为平面直角坐标; t 为时间; H 为水体总水深; h 为平均水面以上的水位; u 和 v 分别为 x 和 y 方向垂线平均流速分量; θ 为大通站流量; A 为河流断面面积; B 为河流宽度; R_h 为水力半径; g 为重力加速度; C_f 为谢才系数; f 为柯氏力系数; C 为垂线平均氯度; D_x 和 D_y 分别为 x 和 y 方向的综合扩散系数. (2) 边界与初始条件: 在二维潮流模型中, 陆地边界取法向流速为零, 即 $V_n = 0$; 下边界南支口外 -20 m 等深线处用水位来控制. 一维模型计算得到的相应水位传递给二维模型上边界江阴站作为其边界条件; 一维模型上边界贵池站则用流量作为边界条件, 二维模型计算得到的水位传递给一维模型下边界江阴站作为其边界条件. 在计算过程中, 由于初始条件对计算结果影响不大, 本潮流模型中采用:

$$h(x, y, 0) = 0, u(x, y, 0) = 0, v(x, y, 0) = 0.$$

在二维氯度扩散模型中, 陆地边界上取氯度法向梯度为零, 即 $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$; 下边界南支口外 -20 m 等深线处采用口外海水氯度作为边界条件; 上边界江阴站则采用淡水氯度. 由于本二维氯度分布模型中, 上下边界氯度相差很大, 因此, 初始条件对验证计算收敛快慢有很大的影响. 为节省调整氯度场的前期计算时间, 本模型则根据实测氯度资料, 分区给定氯度的初始条件.

2.3.2 验证计算 由于本模型计算范围广, 需要计算时间长, 因此, 为节约计算时间, 采用空间步长 $\Delta S = 1000$ m; 在满足稳定性的条件下, 取时间步长 $\frac{\Delta t}{2} = 240$ s. 谢才系数 $C_f = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$, 计算中考虑到糙率系数 n 随水深而变, 取 $n = 0.7 \times 10^{-3} H + 9.0 \times 10^{-3}$. 综合扩散系数 D_x 和 D_y 计算中取等值 $10 \text{ m}^2/\text{s}$.

根据上述条件, 对计算范围内各站潮位和氯度分别进行验证计算. 结果表明, 各站计算得到的潮位与实测潮位十分接近, 两者基本相符, 潮位误差均在 10 cm 以内. 各站计算的氯度过程线与实测氯度过程线的拟合也较好, 完全满足计算的精度要求.

2.3.3 计算结果分析 利用二维氯度分布数学模型, 本研究分别计算了现状、海平面上升 0.5 m 和 0.8 m 三种情况下, 南支河段氯度沿程分布的变化. 由于计算区域具有出入流边界, 海平面上升后的边界条件难以给定. 因此, 计算过程中首先假定: (1) 长江口河底地形基本不

变. 由于地形因素不是河口盐水入侵的主要影响因素, 地形的变化对盐水入侵强度的影响很小, 因此, 作这样的假定对河口氯度分布数值模拟计算是合理的; (2) 下边界氯度 (即口外海水氯度) 值保持不变. 事实上, 口外海水氯度变化是很小的.

计算表明, 海平面上升, 整个南支河段水体含氯度均明显增加, 海平面上升幅度越大, 氯度增加越显著, 而且在大潮高潮时氯度增加明显大于低潮时. 若遇长江特枯水年流量最小月份, 海平面上升 0.8 m, 将导致大潮期南支徐六泾以下河段水体含氯度几乎全部超过 250×10^{-6} 的居民生活用水氯度控制标准 (图 3). 由于海平面上升, 外海盐水经南北港直接入侵以及北支盐水倒灌南支的强度都相应增加. 因而使主要受外海盐水直接入侵影响的南槽河段和主要受北支倒灌盐水影响的白茆口至宝山河段, 水体含氯度的增加幅度远大于其他河段.

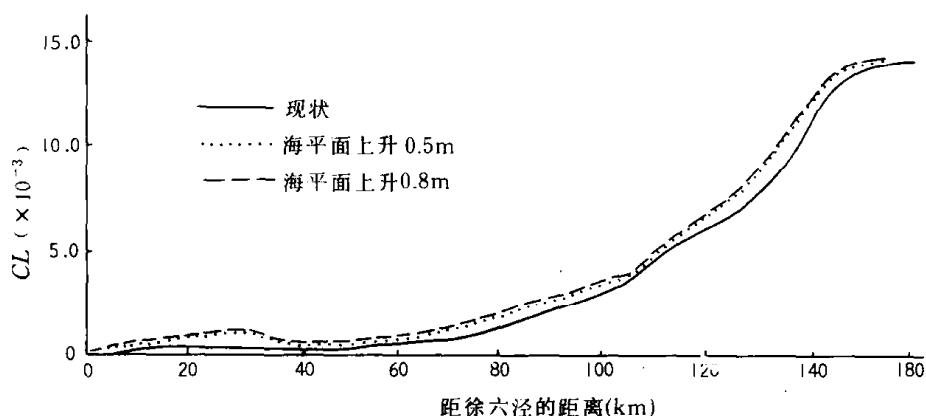


图3 海平面上升对南支河段氯度沿程分布的影响

3 结 论 与 建 议

(1) 全球变暖引起的海平面上升对长江口盐水入侵的影响程度主要取决于长江下泄入海流量的大小和海平面上升幅度. 海平面上升 0.5 m 时的影响主要是发生在流量不足 $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下; 而当海平面上升超过 0.8 m 时, 在长江流量保持在 $13 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时就将对其产生严重影响. 只有当流量大于 $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 影响才不明显. 从长江多年入海流量资料来看, 枯季长江月均下泄流量不足 $13 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的机率可达 60% 以上, 不足 $11 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的机率也达 40%, 而大于 $15 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的机率则不足 18%. 因此, 必须高度重视下一世纪全球海平面上升对长江口枯季盐水入侵的影响.

(2) 为保证长江口地区社会经济发展和人民生活用水需要, 面对下一世纪海平面上升加剧的盐水侵入危害, 必须及早考虑将城市供水取水口上移或建立边滩避咸蓄淡调节水库等预防措施, 减轻它的危害. 此外, 封堵北支可以增加南支下泄水量, 彻底消除北支盐水倒灌的影响, 对降低南支吴淞口以上, 特别是宝山以上河段水体含氯度起相当大的作用.

(3) 海平面上升加剧的河口盐水入侵, 不仅对河口地区的供水产生严重危害, 而且会影响整个河口区的生态环境, 如河口水动力、水化学特性、化学元素的迁移沉积作用以及生物种类组成和数量变化等. 这种影响十分复杂, 今后有待于在对河口各环境要素长期观测的基础上, 进行更深入、全面的研究.

参 考 文 献

- [1] Gronitz, V., *Global and Planetary Change*, 1991, 3:379 — 398.
- [2] Titus, J. G., 国外第四纪地质, 1990, (3):1 — 14.
- [3] Vellinga, P., Leatherman, S.P., *Climatic Change*, 1989, 15:175 — 189.
- [4] 韩乃斌, 地理研究, 1983, 2:99 — 106.
- [5] 陈吉余、沈焕庭等, 长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集, 科学出版社, 北京, 1987, 350 — 368.
- [6] Warrick, R., Oerlemans, J., *Climate Change-The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, New York, 1990, 263 — 281.
- [7] Pirazzoli, P. A., *Global and Planetary Change*, 1989, 1:241 — 258.
- [8] Oerlemans, J., *Climatic Change*, 1989, 15:151 — 174.
- [9] 胡惠民、黄立人等, 中国气候与海面变化研究进展 (一), 海洋出版社, 北京, 1990, 64 — 65.