

南水北调对长江口盐水入侵影响的预测

韩 乃 斌

(南京水利科学研究所)

提 要

本文简单地介绍了长江口地区盐水入侵情况,洪季长江上游径流量大,盐水入侵区在长江口外,对工农业生产没有什么影响。枯季,特别在干旱年份,长江口盐水入侵较为严重,在最不利的情况下,整个南支河段可为3%左右的盐度所控制。文中根据实测资料的统计分析,预测了枯水年、平水年和丰水年南水北调对上海市吴淞口氯度变化的影响;还采用一维近似计算和相关分析法两个途径,预测南水北调后长江口5%盐水入侵长度的变化情况。最后指出,洪季调水对长江口盐水入侵影响甚微,枯季调水,则需持慎重态度。长江口北支是盐水入侵的第二个自然污染源,如果堵塞北支,则可完全抵销南水北调所带来的对长江口盐水入侵的影响。

一、前 言

南水北调东线方案预期的调水量为1000立方米/秒,约占长江多年平均流量的二十九分之一,最枯流量的五分之一,工程实施后,将对长江口盐水入侵产生一定影响,引起上海市和长江口地区工农业用水水质的变化,并影响鱼场的位置、范围和产量。因此,有必要对这个问题作出科学的预测。

河口盐水入侵与径流量的大小、潮汐强弱、河道深浅、海口的含盐度以及风浪等因素有关。本文通过对长江口实测资料的统计分析和一维近似计算,预测南水北调东线方案实现后长江口盐水入侵的变化情况。

二、长江口盐水入侵概况

(一) 盐水入侵的型式

长江是我国第一大河,年平均径流量接近1万亿立方米。河口潮流亦强,潮波可上溯至河口以上640公里的大通附近。长江口口门宽达90公里,水域极为辽阔,水文特性和河床演变非常复杂(见图1)。长江口径流变化范围为4620~92600立方米/秒,最大变幅达

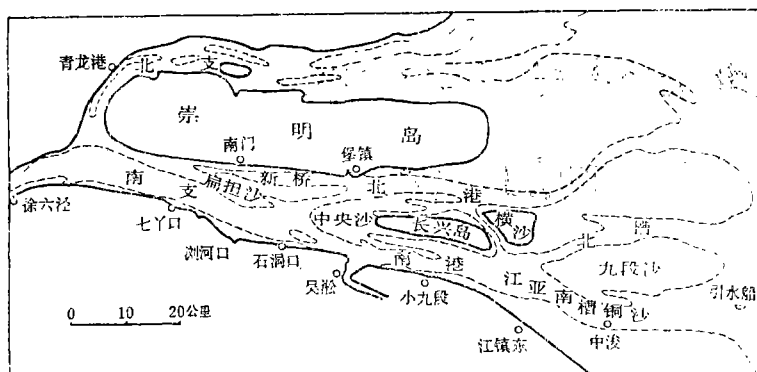


图 1 长江河口示意图
Fig.1 The Yangtze Estuary

在大洪水排洪期间，遇上特别小的潮差，盐淡水混合接近于高度分层型。例如，1962年7月大通流量为 68000 立方米/秒左右，小潮期间，引水船地区表底层盐度差经常保持在 20~25‰，在相对水深 0.4~0.8 之间含盐度有突变之处。

在洪枯水的其他情况下，等盐度线以楔状伸向上游，5‰等盐度线的坡降约为 1‰左右，这种混合状况属于缓混合型。实测资料表明，洪季出现缓混合型的机率在 75%以上，枯季约为 50%，全年出现缓混合型的机率在 60~70%。

(二) 长江口盐水入侵的平面分布

长江口有南槽、北槽、北港和北支四个入海口门，北支经常向南支倒灌水量。根据实测资料估计，大潮时北支每潮向南支倒灌的水量为 1 亿立方米左右，倒灌盐量可达 150 万吨。整个枯季倒灌水量约为 152 亿立方米，倒灌盐量可达 2.28 亿吨。这么巨量的溶解盐势必先在南支河段扩散开来，然后才能排到外海去。北支已成为南支河段盐水入侵的自然污染源。

南支三槽的盐水入侵情况与它们的径流分配比和沿岸的海流有关。以 1978 年 8 月水文测验为例，当时正值夏季，具有高温高盐的台湾暖流自南向北先后与南槽、北槽和北港水流交会，测验期间上游平均下泄的淡水流量为 23200 立方米/秒，其中北港占 67.2%，北槽占 38.3%，南槽占 -5.5%（即倒灌）。从南槽、北槽和北港涨憩表底层盐度分图来看（图 2），南槽盐水入侵最强，北槽次之，北港最弱。盐水入侵强度与三槽的径流分配比相应，与台湾暖流经过的先后次序也相符。

冬季上游径流量比较小，长江口为渤海南下的苏北沿岸流所控制。苏北沿岸流先后与北

20 倍，年内变幅一般在 7 倍左右。潮差的变化范围为 0.17~4.62 米，最大变幅达 28 倍，月内变幅在 10 倍左右。在不同的径流和潮差组合情况下，可以出现各种不同的盐水入侵型式。

枯季大潮汛期期间，盐淡水混合比较强烈，竖向密度差较小，属于强混合型。

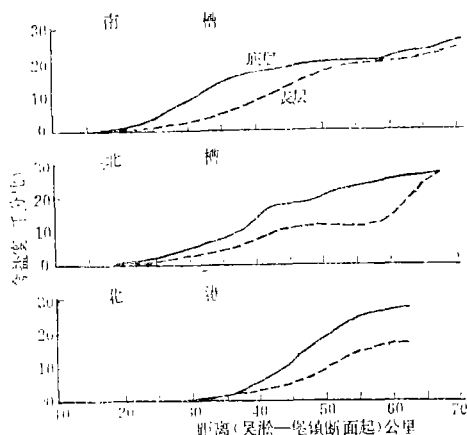


图 2 长江口三槽涨憩表底层盐度分布图

Fig.2 Surface and bottom salinity distribution at flood slack along three channel of the Yangtze Estuary.

港口、北槽口、南槽口水流相交会, 三槽的含盐度也是自北向南逐渐减小。几乎在同一断面上的北港堡镇与南港吴淞相比, 枯季堡镇的含盐度均大于吴淞的含盐度。

(三) 南支河段盐水入侵的特性

南支河段洪季基本上没有盐水入侵问题, 枯季盐水入侵比较严重。枯季大潮汛时, 由于北支高盐水体向南支倒灌, 氯度分布出现反常现象, 位于上游的七个口站出现比下游浏河口和吴淞口大得多的氯度峰值。从吴淞口到七个口, 氯度有沿程增加的趋势。小潮汛时, 没有北支倒灌这个因素, 恢复氯度正常分布。

应该指出, 北支正处于自然衰亡过程中, 北支倒灌也经历着由小到大和由强到弱的盛衰过程。50年代末到70年代末, 北支经历了倒灌日益加剧这一过程。从70年代末开始, 由于南北支会潮点向北支下游方向移动^[1], 北支倒灌量已逐渐减少, 从这个意义上讲, 南支河段盐水入侵最严重时期已经过去, 今后趋向好转。

(四) 吴淞口氯化物含量的变化规律

1. 长江上游径流的影响

每年5月中旬到11月中旬, 长江上游径流量大, 吴淞口基本上为淡水所控制, 洪季多年平均氯度大于100PPm的机率只有1.5%。而枯季吴淞口氯度大于100PPm的机率在40%以上。

由于长江径流是控制吴淞口水质的主要因素, 本文试图寻找长江上游流量和吴淞口氯度的相关关系。分析表明, 吴淞口每年超过某一氯度例如200、500、1000PPm的时间(n 小时)与长江上游枯水持续时间和枯水程度有关。本文以每年上游流量小于14000立方米/秒的天数 D 代表枯水持续时间; 以多年月平均最小枯水流量 \bar{Q}_m 与当年最小月平均流量 Q_m 之比代表枯水程度。图3为各种氯度的 $n \sim \frac{\bar{Q}_m}{Q_m} \cdot D$ 的相

关曲线。用最小二乘法计算可得下列回归方程, 其相关系数在0.9以上。

$$n_{200} = 77 e^{0.025 \frac{\bar{Q}_m}{Q_m} \cdot D} \quad (1-1)$$

$$n_{500} = 33 e^{0.0264 \frac{\bar{Q}_m}{Q_m} \cdot D} \quad (1-2)$$

$$n_{1000} = 4.3 e^{0.0361 \frac{\bar{Q}_m}{Q_m} \cdot D} \quad (1-3)$$

2. 潮汐影响

长江径流除了洪峰前后月内变化较大外, 一般月内径流变幅不大, 枯水季节, 月内变化更小。上游径流的日变化更可忽略不计, 氯度的月内和日内变化主要是潮汐引起的。

氯度月内变化特点是从大汛到小汛氯化物含量不断增大, 由小汛到大汛则反之。造成大

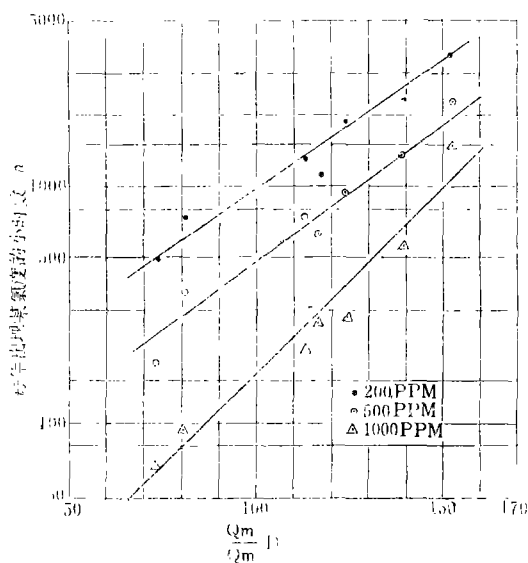


图3 $n \sim \frac{\bar{Q}_m}{Q_m} D$ 相关曲线

Fig.3 Relations between n and $\frac{\bar{Q}_m}{Q_m} D$.

汛氯度小，小汛氯度大的原因有两个。其一，潮差减小意味着低潮位抬高，上游河段的容蓄量增加，起到减少上游径流量的作用。其二，从沿程来看，潮差小，盐度分层严重。这两个因素促使盐水入侵加剧，从而出现潮差小，氯度大的情况。

氯度日内变化跟流速变化极为密切。流速过程线和氯度过程线有对应的关系，即落憩附近氯度最小，涨憩附近氯度最大。

(五) 不同水文条件下，盐水入侵的变化

从长江口历次水文测验来看，枯季落憩 1 % 的含盐度、涨憩 5 % 的含盐度可以上溯到横沙以上的南港河段。洪季落憩 1 % 和涨憩 5 % 盐度都在横沙以下。上游流量越小，盐水上溯越远。

众所周知，盐水入侵长度除与上游流量和潮汐影响有关外，还与河床阻力、口外盐度、河口水深及风波等因素有关。假定长江口的河床阻力，河口水深和风浪等因素变化不大，一般讲潮差小，盐水入侵长度大；如果出现低潮位变化不大的情况，则增加潮差意味着增加进潮量，也就是增加盐水入侵长度。由于潮差对盐水入侵长度有两种相反的作用，在沒有搞清规律之前，暂时先不考虑这个因素。

本文考虑盐水入侵长度主要与上游径流和口外盐度有关。点绘无尺度数 $\frac{S_v}{S_o} \cdot \frac{\bar{Q}}{Q_t}$ 跟 L_i/L_o 的关系 (见图 4)。 S_v 为引水船月平均盐度， S_o 代表长江口外基本不变的盐度，本文定为 30 ‰。 \bar{Q} 为长江多年平均流量，取用 29200 立方米/秒， Q_t 为相应时间上游来的淡水流量。 L_i 为引水船起 5 ‰盐水入侵长度， L_o 为引水船与吴淞之间的距离，等于 76 公里。则得下列相关关系：

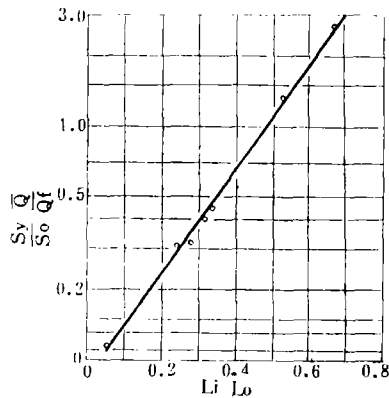


图 4 L_i/L_o 与 $\frac{S_v}{S_o} \cdot \frac{\bar{Q}}{Q_t}$ 的相关曲线

Fig. 4. Relations between $\frac{L_i}{L_o}$ and $\frac{S_v}{S_o} \cdot \frac{\bar{Q}}{Q_t}$

$$\frac{L_i}{L_o} = \frac{\ln \frac{S_v}{S_o} \cdot \frac{\bar{Q}}{Q_t} + 2.477}{5.07} \quad (2)$$

由公式 (2) 可知，在引水船站盐度大，上游流量小时，盐水入侵最严重。

三、南水北调影响的预测

(一) 对吴淞口水质的影响

吴淞口氯度变化直接影响上海市工农业生产用水的水质。南水北调对吴淞口水质的影响是大家关心的问题。本文用实测资料统计分析所得的相关公式 (1-1) ~ (1-3)，选用频率为 10 % 的丰水年，大通最小月平均流量 $Q_m = 12080$ 立方米/秒；相当于多年平均月最小流量的平

水年， $Q_m = 9530$ 立方米/秒；90%频率的枯水年， $Q_m = 7400$ 立方米/秒等三种特征水文年预测调水后吴淞口氯度的变化。这三种水文年小于 14000 立方米/秒的天数分别为 55、92 和 98 天。如果调走 1000 立方米/秒流量，则现在的 15000 立方米/秒就相当于调水后的 14000 立方米/秒流量，三种水文年小于 15000 立方米/秒的天数分别为 61、99 和 104 天。计算所得的吴淞口水质变化见下表：

表 1 南水北调后吴淞口水质变化预测表

Tab. 1. Prediction of chlorinity at Wusong due to water diversion from the the Yangtze river to northern China.

氯 度 (PPm)	丰 水 年 ($Q_m = 12080 \text{米}^3/\text{秒}$)			平 水 年 ($Q_m = 9530 \text{米}^3/\text{秒}$)			枯 水 年 ($Q_m = 7400 \text{米}^3/\text{秒}$)		
	调水前 (小时)	调水后 (小时)	增 加 (%)	调水前 (小时)	调水后 (小时)	增 加 (%)	调水前 (小时)	调水后 (小时)	增 加 (%)
>200	228	286	25	768	1223	59	1788	3697	106
>500	102	132	27	374	612	64	924	1968	113
>1000	21	29	38	119	233	96	409	1152	182

表中反映出丰水年调水 200~1000PPm 以上氯度增加 25~38%，而枯水年调水则增加 106~182%，平水年调水氯度相应增加 59~96%。由此可见，枯水年调水对长江口 盐 水入侵影响要比丰水年调水严重得多。

应该指出，祇有枯季才会出现 15000 立方米/秒以下的流量，因而枯季调水对吴淞口水质影响比较大。洪季，吴淞口附近不在盐水入侵范围内，南水北调对吴淞口水质基本上没有影响。

(二) 盐水入侵长度的变化

1. 用相关分析法估算

根据相关公式 (2)，可以预测上游流量变化所引起的盐水入侵长度的变化。相当于多年平均月最小枯水流量 9530 立方米/秒时，由图 5 查得 S_y 为 22‰，由公式 (2) 计算，落憩 5‰盐水入侵长度为引水船起 49.3 公里。如果考虑南水北调的流量为 1000 立方米/秒，则多年平均月最小流量为 8530 立方米/秒。用同样

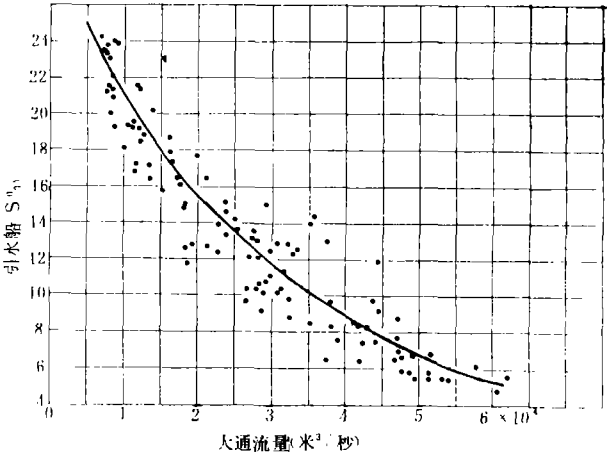


图 5 月平均引水船含盐度与大通流量关系曲线
Fig. 5. Relations between monthly average salinity at pilot Station and discharge at Daton Station.

的方法计算, 可得盐水入侵长度为 51.8 公里, 即南水北调后盐水入侵长度增加 2.5 公里。

相当于多年平均洪季流量 45500 立方米/秒时, S_y 为 7.8‰, 则落潮 5‰ 盐度的入侵长度为 10.3 公里, 如果调走 1000 立方米/秒, 经计算相应的盐水入侵长度将增加为 10.7 公里, 仅增加盐水入侵长度 0.4 公里。洪水时调水对盐水入侵长度影响不大, 枯水时调水对盐水入侵长度有一定影响。

2. 用憩流近似法估算

河口含盐度分布是不稳定的三维问题, 虽然已经建立了三维的微分方程式, 目前尚无法进行数学解析, 一般均简化为二维或一维问题求解。本文为估算南水北调对长江口盐水入侵长度的影响, 将用一维落潮憩流近似法计算^[2,3]。

在长江口情况下, 假定水体的横向交换不大, 忽略沿程水梁变化, 用单宽来代表, 则有如下的盐水扩散方程:

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{S}}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D_x \frac{\partial \bar{S}}{\partial X} \right) \quad (3)$$

式中 \bar{S} 为垂线平均含盐度,

t 为时间,

D_x 为扩散系数,

X 为纵向距离。

流速 \bar{u} 可以分解为潮流速 $u_t(X, T)$ 和淡水流速 V_t 两部分, 则得

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + u_t(X, T) \frac{\partial \bar{S}}{\partial X} - V_t \frac{\partial \bar{S}}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} \left(D_x \frac{\partial \bar{S}}{\partial X} \right) \quad (4)$$

公式 (4) 可以分为两部份, 第一部份代表不稳定流部份, 第二部份代表准稳定流部份。在落潮憩流附近的一般时间内, 可以作为准稳定运动状态来考虑, $u_t = 0$, $\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = 0$,

则公式 (4) 可以简化为

$$-V_t \frac{dS_e}{dx} = \frac{d}{dx} \left(D_x \frac{dS_e}{dx} \right) \quad (5)$$

下角标 “e” 表示落潮憩流的情况。

长江河口很宽, 单宽淡水流速 V_t 很小, 且没有支流汇入, 可假定盐水入侵区 V_t 不变。对 (5) 式中的 X 一次积分得

$$V_t S_e = D_x \frac{dS_e}{dx} + C_1 \quad (6)$$

若 X 很大时, $S_e \rightarrow 0$, $\frac{dS_e}{dx} \rightarrow 0$, 由此可得积分常数 $C_1 = 0$

$$\text{因此} \quad V_f \bar{S}_c = D_x \frac{dS_c}{dx} \quad (7)$$

$$\text{假定} \quad D_x = \frac{D_0 B}{X+B} \quad (8)$$

式中 B 为虚拟的落潮憩流时含盐度分布曲线向海方向的延伸距离。在 $X=0$ 处, $D_x = D_0$, 在 $X=-B$ 时, $D_x \rightarrow \infty$, 这与 $X=-B$ 处, 为维持含盐度不变, 要求无限大的混合是一致的。

把公式 (8) 代入公式 (7), 并对 X 积分得

$$\ln \bar{S}_c + C_2 = -\frac{V_f (X+B)^2}{2D_0 B} \quad (9)$$

积分常数 C_2 , 可以用 $X=-\beta$, $S_c = S_0$ 这个边界条件消去, 则公式 (9) 变为

$$\frac{S_c}{S_0} = \exp \left[-\frac{V_f}{2BD_0} (X+B)^2 \right] \quad (10)$$

采用长江口实测资料分析所得的 D_0 和 B 的经验关系^[4], 即可预测南水北调对盐水入侵长度的影响。

用公式 (10) 计算, 相当于多年月平均最小枯水流量, 南水北调后, 盐水入侵长度增加 1.7 公里。相当于多年平均洪季流量 45500 立方米/秒, 南水北调后盐水入侵长度增加 0.2 公里。

由此可见, 用憩流近似法计算的结果和用实测资料作相关分析推算的结果相近, 两者的结论也是一致的。洪季调水对长江口盐水入侵长度影响不大, 枯季调水对盐水入侵长度的影响比洪季大得多。

四、结 语

1. 现有资料表明, 长江口盐水入侵程度主要由长江径流控制, 洪季盐水入侵影响不大, 枯季盐水入侵较为严重。由于受北支倒灌的影响, 在最不利情况下, 长江口南支河段可以为 3% 左右的盐水所控制。盐水入侵对长江口沿岸地区农业产生了不利影响, 在特别干旱年份, 崇明等地不得不压缩早稻种植面积。由于盐水入侵, 使上海一些水质要求高的工厂, 产品所消耗的原材料增加, 质量下降。

2. 丰水年调水, 吴淞口 200~1000PPm 氯度增加 25~38%, 平水年调水增加 59~96%, 而枯水年调水则增加 106~182%, 枯水年调水对吴淞口水质的影响要比丰水年严重得多。

3. 采用相关分析和一维落憩近似法估算, 调走 1000 立方米/秒流量, 平均枯水年, 落憩 5% 的盐水入侵长度增加 1.7~2.5 公里。在多年平均洪水时调水, 增加的盐水入侵长度不到 0.4 公里。

综上所述, 枯季长江口地区盐水入侵已经较为严重。如果再加上南水北调这个因素, 将增加盐水入侵长度, 使长江口地区工农业生产用水水质进一步恶化。因此枯季调水需持慎重态度。洪季长江径流量大, 调走1000立方米/秒流量, 占长江径流量的百分比小, 对长江口盐水入侵的影响可以忽略不计。

应该指出, 北支倒灌是造成长江口枯季盐水入侵较为严重的主要因素之一。如果堵塞北支, 小汛时可以集中上游淡水流量抵御盐水入侵; 大汛时可以减少北支倒灌到南支的盐水量。假如南水北调和堵塞北支两工程同时实施, 堵北支减少的盐水入侵可以抵销南水北调所产生的盐水入侵的影响。即使不堵北支, 随着北支的自然衰亡, 江口盐水入侵程度也会趋向减弱。南水北调对长江口盐水入侵的影响, 可以采用堵北支一类工程措施加以克服。

参 考 文 献

- 〔1〕 邹德森: 长江河口北支近百年水文地貌的演变及发展趋势分析, 江苏水利科技, 第一期1981年。
- 〔2〕 Harleman D.R.F., Abraham G., One-dimensional analysis of salinity intrusion in the Rotterdam Waterway, Delft Hydraulics Laboratory Publication No.44, 1966.
- 〔3〕 Harleman D.R.F., Hoopes J.A., The prediction of salinity intrusion changes in partially mixed estuaries, I.A.H.R. 10th congress, 1963.
- 〔4〕 黄胜等: 长江口拦门沙淤积分析, 河流泥沙国际学术讨论论文集, 1980年。

PREDICTON OF THE CHANGES OF SALINITY INTRUSION IN THE YANGTZE ESTUARY

Han Nai-bing

(Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract

Based upon the analysis of observed data, this paper shows that the length of salinity intrusion of the Yangtze Estuary is mainly controlled by runoff. During flood season the effect of salinity intrusion is negligible, while at dry season it is remarkable and 3PPT salinity water may be found throughout the South Branch.

The following results can be obtained by means of the method of correlation:

(1) The variation of dimensionless parameters $\frac{S_y}{S_0} \cdot \frac{\bar{Q}}{Q_f}$ with L_i/L_0 , which expresses the change of the length of salinity intrusion.

(2) The relation of the probability of emergence of more than 200, 500, 1000 PPM Chlorinity at wuson to the runoff at Datong.

According to these analyses, the length of salinity intrusion and the chlorinity at wuson can be predicted by the effects of diversing discharge of the Yangtze River into Northern China. If fresh-water discharge of 1000 c. m. s is diversified, the length of 5PPT salinity intrusion at ebb slack will be increased about 0.4 KM. during flood season, while at dry season it can be increased about 2.5KM. Meanwhile the time of emergence of more than 200-1000 PPM chlorinity at wuson will be increased by factor 25-38 percent during flood year, or increased by factor 109-182 per cent during dry years. So the effect of water diversing is more serious in dry years than in flood years.

The computed results of the length of salinity intrusion by means of the approximate method of ebb slack are also presented. The results correspond with those of the correlation.