

美国飓风风暴潮预报

Wilson A. Shaffer, Chester P. Jelesnianski, 陈杰

(美国国家天气局系统发展司技术发展实验室)

提 要

美国国家天气局已发展了一种飓风风暴潮模式,即SLOSH模式,用其计算飓风风暴潮,给定风暴资料,做为输入参数。这个数值模式把动力海岸线、由风暴引起的洪水漫滩、次网格特征具体化,如障碍物、障碍物之间的缺口、海水沿可变宽度河道的一维流动。SLOSH模式已被用于墨西哥湾沿岸美国的大部分地区和大西洋海岸常遭飓风袭击的区域。本文提供了模式使用的情况和对于飓风风暴潮预报的某些局限性。SLOSH模式应用的一些特例取自1985年Elena飓风。

SLOSH模式除了用于实时风暴潮预报外,还广泛用于飓风防汛疏散计划。这个模式用几百个假想的飓风进行运算,是依据区域气候学来选择所计算的飓风,对每个预想的风暴,模式计算出淹水范围,把这些淹水类型结合起来,可帮助确定一个区域遭飓风袭击的程度。同时,模式计算的风,可帮助规划人员确定疏散时路线,是否由于大风而阻塞。联邦和地方政府机构把这些信息与人口研究和道路能力估计结合起来,制定出一种综合的疏散计划。这种计划的成果之一是“疏散时间”——当飓风来临时沿海地区为了安全疏散需要提前撤离的时间。

一、前 言

飓风引起的风暴潮——由风暴直接引起的水位异常增高——给沿海生命造成了最严重的威胁。回顾过去的情况,1900年的那次飓风,袭击了得克萨斯州的加尔维斯顿,造成5000~6000人死亡。这次风暴被列为与美国灾害有关的破坏性最强的天气,加尔维斯顿岛被这个庞大的飓风引起的风暴潮全部淹没,死亡的大多数人是被淹死的,岛上的所有建筑实际上全被摧毁。

近年来,1969年的Camille飓风洗劫了密西西比州的Gulfport湾岸,估计最大风暴潮达24英尺,这个沿海地区1985年又遭到Elena飓风的威胁,不过,由于幸运的风暴路径,这个区域没被强风暴潮侵袭,假如Elena的路径更南一些在海上移行,那末从密西西比州的圣·路易斯湾到比罗克斯的大部分沿海的风暴潮能达到13—15英尺。(1英尺等于0.305米)然而,Elena的损害,主要限于风的问题,风暴潮的损害是较少的。

国家天气局长期以来已认识到了我国沿海风暴潮的威胁,尤其是对于当今广阔的海岸

带开发,国家天气局已发展了两个数值模式,试图在飓风来临时预报风暴潮的高度。第一个是SPLASH模式(即Special program to List the Amplitude of Surges from Hurricanes的缩写),用它可计算出沿岸一带风暴潮高的分布。另一个是更复杂的SLOSH模式,(是Sea(海), Lake(湖)和overland(陆上) Surges from Hurricanes的代称)。对风暴潮的处理扩展到包括内陆水面的泛滥,以及海水漫滩。另外,模式对河流的逆水处理比较勉强。在墨西哥湾的大部分沿岸地区和大西洋沿岸的实验中,SLOSH模式已取代了SPLASH模式进行风暴潮的估算。

二、SLOSH模式

SLOSH模式在空间上是二维的,包括大陆架水域、内陆水域和地形。流体运动方程采用数值解,考虑了有限振幅效应,略掉了运动方程中的平流项。SLOSH用“时间演变”底应力(Platzman 1963; Jelesnianski, 1967)修正了有限振幅效应。在任意给定点,计算的风暴潮被用于模拟出长重力波的“时间演变”——观测的静止水面的风暴潮如同潮位站的水文记录或浮码头的记录。短周期现象,如风浪以及与之有关的增水被略掉。

SLOSH模式的所有海域,除了Okeechobee湖用笛卡尔网格外,都用极坐标网格。极坐标网格的主要优点是提高了所计算地区的分辨能力,并将边界条件从计算域向外推得更远。

在运算以前,SLOSH模式必须被制作到该区域的地理图上,地形或水深值必须填到模式区域的每个网格上,阻挡水流的屏障必须描画出来,这种屏障包括海岸沙丘、天然沙脊、暗礁码头堤岸,以及人工建筑物,屏障之间的缺口也必须专门留出水流的进口。另外,既深又窄的航道和宽度变化的河流也得具体化。这些地区资料要逐个地从几百张地图上摘出来。美国大地测量局标准地形方格图和国家海洋调查局的水深图是我们最有用的图。与SLOSH模式嵌套的是一种飓风风场模式——这或许是SLOSH模式最重要的特征。模式的风场是由特定的飓风中心气压和最大风速半径构成的。关于风速廓线半径,是从风暴中心测量的。风场模式中几种力相互平衡,所以风、气压和穿过等压线的流入角是平衡的。风速随风暴向前移动加以修正,给出一个具有不对称特性的风暴。不过,要注意,风速本身并不直接输入模式,而是模式中计算的一个变量。飓风内的风不好确定是这种变量的选择一个原因。在海面风、航空探测风、最高风速及一分钟平均风速等之间存在一些混乱,使用者的经验是,SLOSH模式得出的风与海上航线上观测的十分钟平均风速非常一致。SLOSH模式的输入,受到有经验的飓风预报员预报的某些参数的限制(至少在理论上)。首先,也是最显然的,输入SLOSH模式的是飓风的路径,在飓风登陆前48小时及登陆后24小时,每隔6小时的风暴所在位置的经、纬度必须给出。(在飓风不登陆的情况下风暴最接近计算域内某给定点的时间代替登陆时间)。另一个时间变量的输入是风暴中心气压,用它来表示飓风的强度。最后一个时间变量的输入是风暴的最大风速半径,它能把大尺度飓风(如1960年Carlan飓风)从小风暴中区分出来(如1969年Camille飓风)。把中

心气压和最大风速半径都记入每六小时的风暴中心位置上, 每六小时位置之间的风暴位置及有关参数是通过样条曲线拟合得到的值。

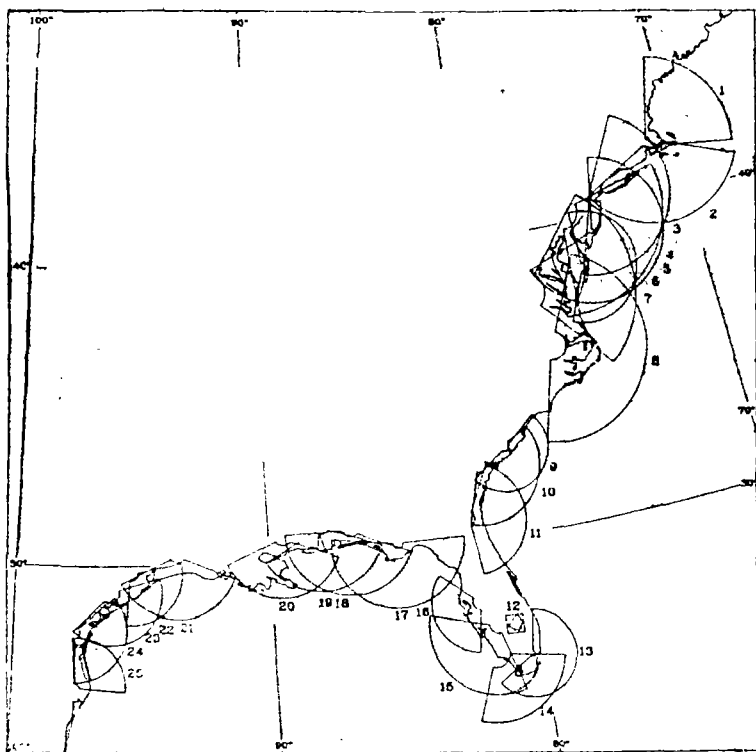


图1 国家天气局目前投入业务使用的25个SLOSH模式海域。

* 部分表示综合疏散研究正在进行或研究已经完成的海域

SLOSH模式海域名称表

- | | |
|-----------------|-------------------|
| 1. 波士顿湾 | 14. 佛罗里达湾 |
| 2. 纳拉甘西特湾/巴泽姆湾 | * 15. 查罗特湾 |
| 3. 纽约/长岛海峡 | * 16. 塔姆帕湾 |
| * 4. 德拉华湾 | 17. 阿帕拉奇科拉湾 |
| 5. 大西洋城 | * 18. 彭萨科拉湾 |
| 6. 大洋城 | * 19. 莫比尔湾 |
| * 7. 切萨皮克湾 | * 20. 庞特查特合湖/新奥尔良 |
| * 8. 帕姆里科湾 | 21. 萨宾湖 |
| * 9. 查尔斯顿港湾 | 22. 加尔斯顿湾 |
| * 10. 萨凡纳/希尔顿里德 | 23. 马塔戈达湾 |
| 11. 布克伦斯威/杰克逊维尔 | * 24. 科帕斯克里斯蒂湾 |
| 12. 奥基乔比湖 | * 25. 拉盖纳马德尔 |
| 13. 比斯卡因湾 | |

三、“实时”预报和模拟运算

SLOSH模式是为了预报任意飓风在给定海域引起的风暴潮而设计的,考虑了以往这个地区有关飓风方面的经验,即使在某个海域没有出现过飓风,SLOSH模式也能计算出可信的风暴潮预报值。原因是SLOSH模式不是对任意给定风暴在某个海域调试出来的,相反,这种能用于所有海域的通用公式能适应这种变化,就象海面阻力系数一样。SLOSH和它的风场模式已用于海湾和大西洋沿岸许多不同的飓风,尽管模式风资料比不上出版的或所谓观测的风资料,但这种突出的特征仍被保留着。

在每个SLOSH海域,当能获得充分的气象和风暴潮资料时,就用历史飓风进行模式模拟运算。“最合适”的路径、强度和最大风速半径是仔细分析气象资料估计出来的,然后输入SLOSH模式。通常,在这种模式验证中,具有足够资料的历史飓风只有1~2个。为了全面估计SLOSH模式的精度,要把风暴潮的计算值与实测值对许多历史风暴和许多海域进行比较,比较的结果表明,SLOSH模式计算的风暴潮大约有 $\pm 20\%$ 的误差(Jarvinen和Lawrence, 1985)。特别要指出当气象资料是“准精确”时,其计算误差是明显存在的。

SLOSH模式最关键的输入参数是飓风的路径,假如,象在Elena飓风时的情况,预报在佛罗里达的Cedar Key登陆,但实际上在密西西比Biloxi登陆,SLOSH模式的风暴潮预报是完全错误的。

目前,国家天气局预报的飓风位置,24小时预报平均有 ± 100 英里的误差,由于在台风登陆时这么不准确,预报人员不能光根据SLOSH模式一种运算制作他们的风暴潮预报而是对几种运算进行审查,得出飓风来临有可能引起风暴潮淹水的全面看法。

对一个给定的飓风可能淹水的全面看法可在飓风来临前很长时间进行估算,为了进行这种估算,国家天气局研制了一种方法。SLOSH模式试算了大量的假想飓风——在某些研究中接近300个——改变飓风的强度、尺度、移速和路径。为了确定最可能的条件,首先要研究气候状况,例如新奥尔良地区,从气候资料中根据N, NE, NW, E和W的方向选出各种类似的路径。移速采用两种——移动慢的风暴用每小时5英里;移动快的用每小时15英里,把每种路径和移速结合起来,对于5种Saffir-Simpson分类(1~5)的每种飓风进行试算。在其他海域,对于飓风的特征采用不同的安排。

这样运算出来的资料数量太大,为了把这些资料缩减成对国家天气局预报人员最有用的形式,要进行各种有选择的复合运算,最有用的风暴组合是把相似路径的风暴、沿着这种路径的相同种类和速度的风暴全都归在一起。在每个SLOSH模式网格点上打印出同一风暴所引起的最大风暴潮高值,给出一种综合的被称为最高水位剖面图(Maximum Envelope of Waters)。由于预报人员不能确信飓风一定登陆,我们建议他细查合适的最大水位包络图,以便估计可能的风暴潮。这样就排除了漏掉关键性通道的可能性,在这种水道中可能产生极值风暴潮位,如又长又窄的水道。飓风移动到这种水道上或其轴右侧(观察者背海面陆)将引起小的风暴潮。然而,一个飓风移到这种区域的左侧大约在一

个最大风速半径的距离上,将产生极大风暴潮。

SLOSH模式使用者必须记住,沿海只有一小部分地区经历过与最大水位包络图有联系的大大的淹水,对于垂直于海岸登陆的飓风如果这里海岸线上没有海湾或港湾,最大的淹水将发生在飓风路径的左侧最大风速半径的距离上,如图2所示。沿破碎海岸和内陆水域淹水的详细看法,可以通过细查最大水位包络图获得,或者用更特殊的飓风作最大水位包络图。

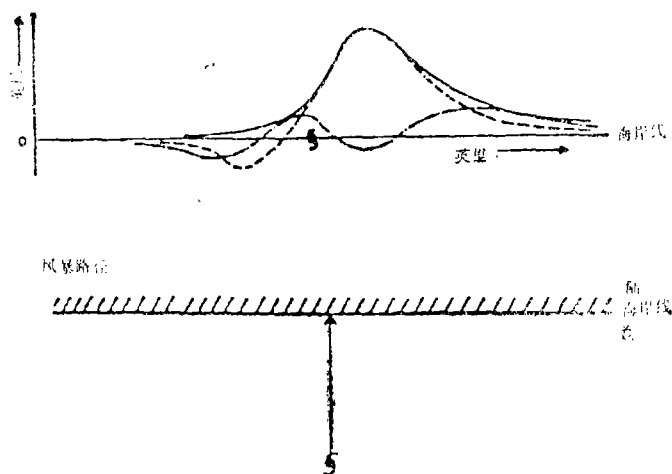


图2 对于飓风垂直于海岸登陆的特殊情况,风暴潮相对于飓风路径的位置

最大风暴潮发生在飓风登陆点右侧最大风速半径附近;

- 表示最大风暴潮廓线;
- 表示最大风暴潮时增水剖面;
- · - 表示风暴潮余振曲线

通常情况下,海岸上的最大风暴潮发生在飓风登陆时,对于海湾或港湾,最大增水出现时间与飓风在开阔海岸登陆的时间也许产生变化值得注意。

当飓风临近东部海岸,潮位的涨落对淹水有重要意义。在某些海岸区域,通常潮差为6英尺或稍大一点,对于这样的海域,预报飓风登陆时间以及用风暴潮与潮位迭加估计淹水将是不切实际的(或计算潮位及其与风暴潮的相互作用)。然而,正如预报飓风登陆位置存在误差一样,预报飓风登陆时间也同样存在误差,24小时预报的平均登陆位置误差接近100英里,这个误差也可以被理解为平均登陆时间误差约为6小时,这大约为多数地方高低潮之间的时间!因此,我们不能确切地预报某个飓风是否将在高潮或低潮时间登陆,大多数预报人员将考虑最坏的可能方案——登陆发生在高潮时。

四、疏散的研究

联邦防汛管理局和美国陆军工程兵部与国家天气局联合进行美国海岸飓风模拟研究,用几百个假想台风对代表各地区的每个海域利用SLOSH模式进行模拟,并注重风暴潮淹

水。最大水位分布图是根据模拟输出资料的逻辑组合做成的。联邦防汛管理局和美国陆军工程兵部用这些资料做为制定全面的地方飓风疏散计划的基础。最后的疏散计划不仅包括SLOSH模式的结果,还包括受影响区域人口和交通状况的研究。

图1、中前面有*号的海域表示飓风疏散研究正在进行中,对这里的每一个海域,SLOSH模式的模拟运算都已完成。

对于国家天气局至关重要的结果是疏散时间,这个时间给国家天气局的预报人员一种预报提前量的概念,这是人们从屏障岛屿和易受淹没地区安全撤离所需要的提前时间。

五、1985年Elena飓风期间SLOSH模式的计算结果

这里,我们用检验对Elena飓风所做的预报来说明SLOSH模式的一些用途以及与其的应用有关的某些问题。这个强飓风在1985年8月29日到9月3日袭击了海湾沿岸许多地区。在Elena最早阶段,风暴正在加强,并走北路移往新奥尔良,位于佛罗里达州迈阿密的国家天气局飓风预报中心没有用SLOSH模式进行运算,因为风暴还远在海湾,确切地说,可用一种合适的最大水位包络试验图,估计沿岸地区可能产生的风暴潮位,对于迅速偏北移动的2类飓风将出现8~12英尺的风暴潮,偏北移动风暴的最大水位包络资料表明,最易受灾的地方位于路易斯安娜州的Slidell和密西西比州的Gulfport之间。

后来,风暴自东偏转预计登陆在佛罗里达州的Cedar key,根据实时SLOSH模式预报发布了8~12英尺的风暴潮预报(与最大水位包络资料相反),飓风Elena减速并在Cedar Key附近打转,然后向西行。对于向西的路径,根据实时预报风暴潮的估值仍保留8~12英尺。

随着Elena飓风向预计的登陆点密西西比州的Biloxi-Gulfport地区移行,进行了两种实时SLOSH运算,一种是预计路径大约在路易斯安娜州的Slidell之南5英里(图3),另一条预计路径穿过新奥尔良,预报人员认为两条路径中登陆Slidell那条路径更可能些,另一条路径对新奥尔良地区更加危险。

图3还给出了预报飓风穿过Slidell之南5英里时SLOSH计算的风暴潮位。原来,这种路径,对于向西移动的这类飓风,会引起沿岸某些地方很可能淹水,请注意,在St. Louis海湾地区,计算的风暴潮高是16英尺!沿着海岸外边,计算风暴潮的变化幅度,在Rigolets接近12英尺,至St. Louis海湾正南是15英尺,往东回降到10英尺,再往东则更低些。影响新奥尔良地区的最高水位用SLOSH模式计算的为6—8英尺。

SLOSH模式运算预报的风暴潮没有观察到。为什么?原因在于,事后要用“拟合最好”的风暴路径及其他参数进行SLOSH运算。当然,这些参数在Elena飓风登陆之后才能得到。现在这些拟合最好的参数值是取自于现有可以得到的资料。随着更多资料的分析,拟合较好的风暴路径、强度和尺度是可以获得的。

当SLOSH模式根据拟合“最好”路径运算时,计算的风暴潮达8英尺,在Gulfport-Biloxi地区附近沿海约为7英尺。在圣·路易斯湾计算的风暴潮仅为3英尺——远远低于用原来预报路径计算的值。在这次运算中,值得注意的最大风暴潮出现在Pascagoula湾地区。

如果Elena穿过预报路径,将出现接近15英尺的风暴潮(见图3)。然而,由于Elena的实际路径(图4)正好穿过离海岸15~20英里的地方,风全是离岸吹。因是离岸风,水被吹离海岸线,产生负风暴潮,局地观测表明是这个情况,Gulfport的验潮记录十分突出地说明这一点,如图5所示。只有飓风中心穿过一定位置后风向转为向岸风,才可能产生风暴增水。水位在风向转换时是降低的,在正风暴潮产生之前,水位只能从这个降低阶段回升。这与减弱的飓风和风暴后较弱的风相耦合,导致了这次中等振幅风暴潮的计算值和观测值(见图4和图6)。

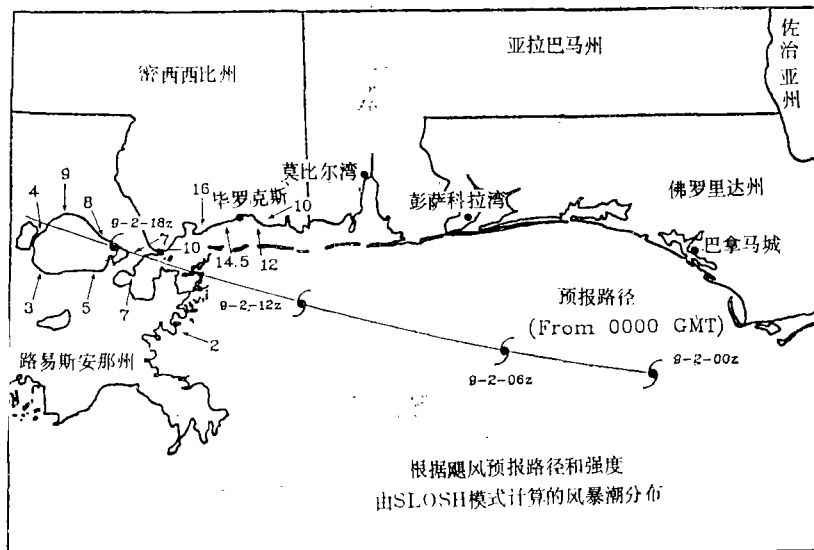


图3 用预报的飓风路径和强度由SLOSH计算的风暴潮
风暴潮值是国家测地垂直基面(NGVD)上的英尺数

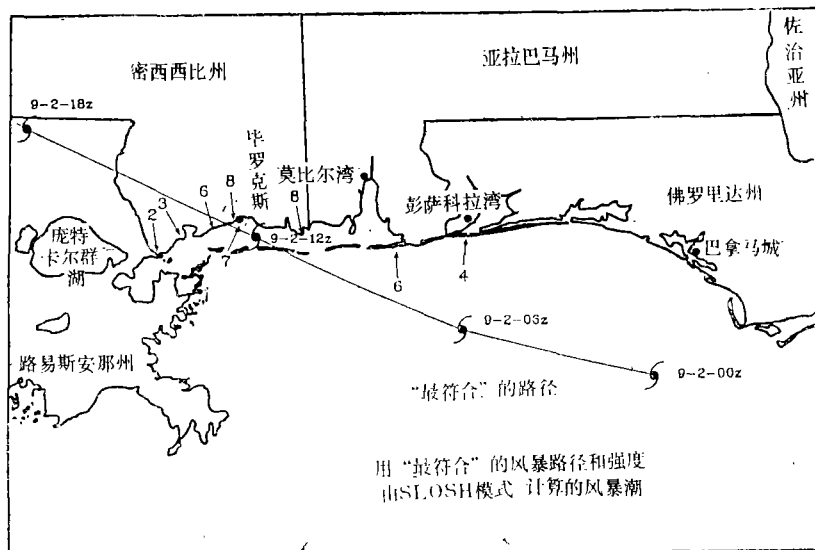


图4 Elena飓风登陆后用“最符合”路径计算的风暴潮高
其他说明同图3

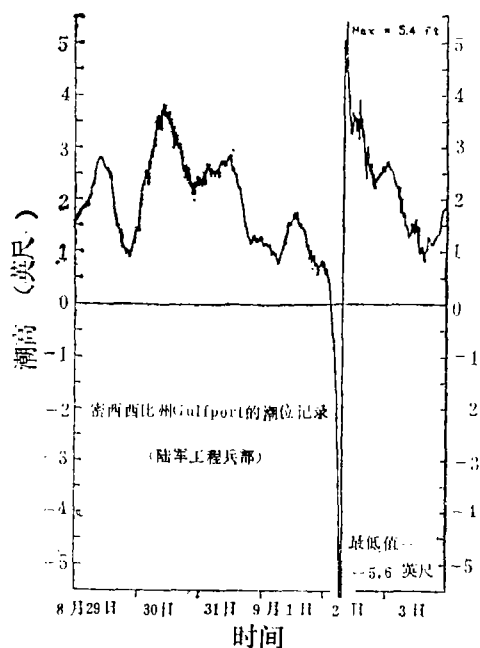


图5 Elena期间密西西比州Gulfport潮位记录实况
(潮位随着Gulfport风的转变由-5.6英尺迅速地上升到5.4英尺)

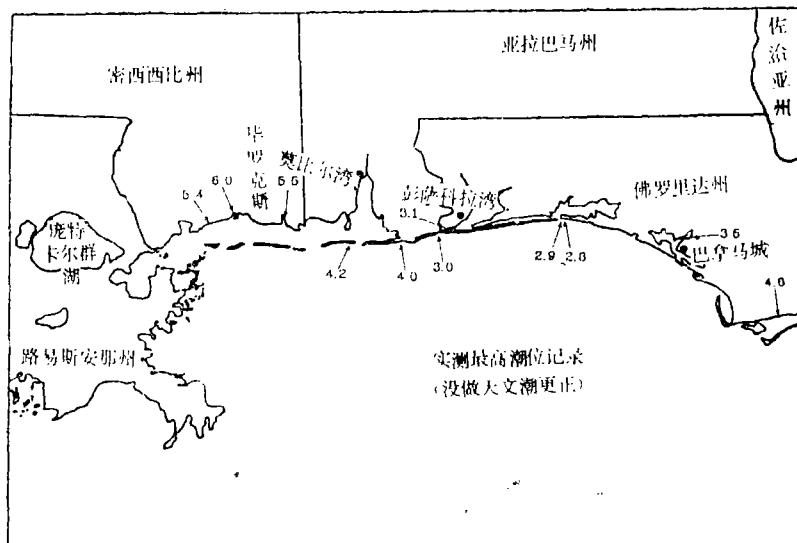


图6 在飓风Elena期间沿着湾岸观测的最高潮位记录
(没有进行天文潮更正)
潮高是NGVD之上的英尺数

六、与最大水位分布和SLOSH有关的一些问题

在Elena飓风期间和之后，主要关心的问题之一是用SLOSH模式得出的过高的风暴潮预报值，几个应用者检查了SLOSH模式的最大水位包络资料，并在经历过的最大水位包络中标出预计的广泛淹水。最大水位包络的恰当应用，能表明一个飓风可能淹水和不淹水的范围。SLOSH模式用“最适”路径计算的风暴潮值（图4）和观测值（图6）是非常一致。遗憾的是用当今的预报方法做出这样的路径预报是难以做到的。

SLOSH模式的另一个问题是保持模式中最新的资料库。例如新奥尔良东部的大堤近来已被加高。由于这些变化在模式资料库中没有考虑，这些大堤越顶也许被估计过高。由于关系到模式资料库问题的缘故，国家天气局将逐年修正新奥尔良slosh海域中大堤的高度。在其它地区，对于陆地沉降，大堤的新建筑、防护堤等，打算定期地加以修正。

（郭洪寿译自“Preprints Oceans 86, Washington, D.C. September 23~26, 1986. 周庆海校）。