

珠江三角洲古今海蚀地形的高度差异及影响因素

王为^①, 吴超羽^②, 许刘兵^①, 韦惺^②, 黄山^①

① 华南师范大学地貌与第四纪环境研究所, 广州 510631;

② 中山大学近岸海洋科学与技术研究中心, 广州 510275

E-mail: wangw@scnu.edu.cn

2010-06-05 收稿, 2010-11-25 接受

国家自然科学基金(40871020, 40601012)和广东省自然科学基金(7005836)资助项目

摘要 海岸平台之所以能指示海面的高度, 是因为海面在岩石海岸上长时间作用的结果. 位于现代珠江三角洲平原上的古海蚀平台远高于珠江口内外现代海岸的现代海蚀平台, 但普遍认为其高度仍在现代海岸动力范围之内, 并且被作为判断全新世地壳升降或海面变化的依据. 从海岸地貌学、海岸动力学、岩体力学等几个方面对造成珠江三角洲古今海蚀地形高度差异的各种因素的影响程度进行了研究. 理论计算表明: 古今珠江三角洲河口湾内平均高潮高度的差异最大不超过 0.3 m; 在广东海岸的波浪条件下, 因波浪差异或海岸岩石强度差异造成的海蚀平台之间的高度差异均不足 0.3 m. 但野外实测数据显示, 珠江三角洲古今海蚀平台高度差异在 1 m 以上, 因此上述因素不是形成古今海蚀地形高度差异的主要原因. 而多年潮汐统计数据则显示, 广东各地海岸高于 3 m(珠江基面)的风暴潮至少要 50 年才有 1 次, 几十年一遇的特大高潮和出现频率极低的特大波浪没有足够的时间塑造相应的高海蚀平台和海蚀穴. 因此, 珠江三角洲古海蚀遗迹的高度已超出现代海面的动力作用范围, 更不是风暴潮波浪作用的结果, 只能是构造抬升或海平面下降的结果, 但如何准确地鉴别构造的作用, 还原海面下降幅度, 则需要更进一步的研究.

关键词

海蚀平台
影响因素
珠江三角洲

海岸平台之所以能指示海面的高度, 是因为海面在岩石海岸上长时间作用的结果^[1,2], 然而, 海蚀平台的高度却与波浪强度、风化作用、岩石强度、岩性(节理、断裂、层面等)、潮差等众多的因素有关^[3]. 华南沿海各地(包括海南岛和西沙群岛沿岸)普遍发育了一级 10 m 以下的海蚀、海积阶地, 其海拔高度大部分集中着 3~5 m(黄海基面)范围内^[4]. 广东沿岸及珠江三角洲平原已发现的 67 处海蚀遗址, 也绝大部分在 2~5 m(黄海基面)之间^[5], 其中包括著名的广州七星岗海蚀遗址^[6]. 对于保留在珠江三角洲平原上的古海蚀遗址, 有不少文献以最高潮水位是否到达这些古海蚀平台来衡量海蚀遗迹的高度是否还在现代波浪作用范围内, 进而判断地壳的升降或海面

的变化^[7,8]. 七星岗海蚀遗址的内外缘高度分别为 3.01 和 2.53 m(黄海基面), 曾被现代特大高潮洪水淹没, 因此其高度被认为仍在现代波浪作用范围内^[7,8]. 最高潮位是指历史上曾经观测到的潮位最高值^[9], 只有天文大潮高潮和台风暴潮同时出现的时候才会有较高的高潮水位, 这时的暴潮波浪才会作用在较高的位置上. 华南海岸(包括珠江口)是中国遭受台风侵袭最多的岸段, 台风暴潮期间的波浪作用强, 对基岩海岸的侵蚀作用自然也很强, 然而, 珠江口是弱潮海岸, 风暴潮作用在高位的机会到底有多大, 这时的暴潮波浪作用又有多大, 能否因此形成高度很高的海蚀平台, 从而造成珠江三角洲地区古今海蚀平台高度的差异? 由于“浅水效应”, 沿岸潮差普遍大于大

英文引用格式: Wang W, Wu C Y, Xu L B, et al. A study of the factors affecting the heights of ancient and present wave-cut benches in the area of the Pearl River Delta(in Chinese). Chinese Sci Bull(Chinese Ver), 2011, 56: 342—353, doi: 10.1360/972010-1035

洋,潮波传入沿岸的港湾时,潮波波高就会增加^[10],珠江三角洲现代河口湾内外的潮差因此不会完全一样,古珠江河口湾和现代珠江河口湾的潮差自然也不会一样,珠江三角洲内陆地区的古海蚀平台与现代海蚀平台高度的差异,是否是因为古今珠江河口潮差的差异造成的?波浪是影响海蚀平台高度的决定性因素之一^[3],广东沿岸波高、波周期不尽相同,这是否也是造成珠江三角洲古今海蚀平台高度差异的原因?岩石硬度也是影响海蚀平台高度的决定性因素之一^[3],构成珠江口沿岸海蚀平台的岩石也各有不同,不同的岩石类型是否是珠江三角洲古今海蚀平台高度差异的原因?上述种种可能性的研究很少见于珠江三角洲海岸研究的文献中.

本文以各种海蚀平台高度计算的经验公式^[11,12]和模拟珠江三角洲发育的 PRD-LTMM(Pearl River Delta long-term morphodynamic model)模型^[13,14]来计算现代和全新世古珠江河口湾内不同时期海面海蚀平台应有的理论高度以及由波浪和岩石的不同造成的珠江口海蚀平台高度差异的可能范围;从华南沿海特大潮重现期、风暴潮的潮位历时、暴风浪的波高,历时等几个方面来论证风暴潮波浪和特大潮位水面能否形成高位海蚀地形;通过实地测量得到珠江三角洲古今海蚀平台的实际高度及差异,并将此实际高度和差异与用上述的理论高度和差异进行对比.计算结果表明,珠江三角洲古海蚀地形已经不在现代海面作用范围之内.

1 研究地点及其自然条件

大虎岛位于现代珠江三角洲的虎门水道上,舢板洲位于虎门以外现代珠江河口湾内(图 1),两者所在海区(荷包岛站)波浪以 SE 向为主,年平均波高为 1.1 m(表 1);潮汐为不正规半日潮,平均海面低于珠江基面 0.16 m(舢板州岛站),平均高潮位为 0.6 m(珠江高程)^[15].

深圳大鹏半岛位于现代珠江口以东大鹏湾和大亚湾之间,南临南海.西冲湾位于大鹏半岛南岸,杨梅坑位于半岛的东北岸(图 1).所在海区(大亚湾站)波浪较小,SE 向为主,年平均波高为 0.8 m(表 1);潮汐为不正规半日潮,平均海面低于珠江基面 0.21 m(港口站),平均高潮位为 0.23 m(珠江高程)^[15].

图 2 是广东沿海各地海岸的平均高、低潮位和最

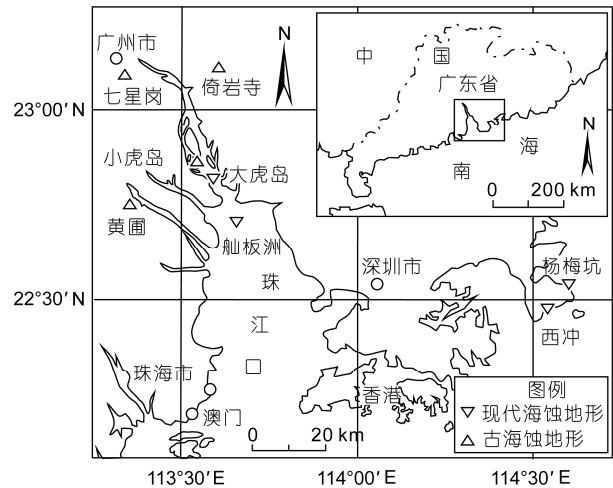


图 1 研究地点

表 1 广东沿海波浪统计^{a)}

	平均波 高(m)	最大波 高(m)	平均 周期(s)	最多 波向	所占 频率(%)
云澳	0.9	6.5	3.9	NE	21.2
汕头海区	1.0	5.3	5.7	E	37
表角	1.3	9.5	4.1	ESE	27.2
汕头海区	0.8	4.6	5.8	SE	32.2
遮浪	1.1	7.3	5.5	SE	41.6
红海/碣石海区	0.6	3.9	5.3	SE	28.2
大亚湾	0.3	1.5	1.6	NE	48.5
大亚湾海区	0.7	4.4	3.5	SE	37.9
荷包	0.9	9.8	3.6	SE	20.8
珠江口海区					
铜鼓湾					
川山海区					
闸坡					
阳江海区					
水东					
茂名海区					
碣洲					
湛江海区					

a) 数据来源: 广东省海岛资源综合调查成果

高、最低潮位^[15]. 如图 2 显示, 包括珠江口在内的大部分广东海岸的平均高潮位不超过 1 m(珠江基面), 平均值为 0.56 m(珠江基面). 然而, 大部分海岸的最高潮位高于平均高潮位 2 m 以上. 表 1 的波浪统计数据表明, 广东沿海大部分海区的平均波高在 1 m 以下, 珠江口荷包岛站的平均波高为 1.1 m.

广州七星岗、增城倚岩寺、中山黄圃、南沙小虎岛的海蚀遗迹是珠江三角洲平原上保护得比较好而且有代表性的著名海蚀遗迹, 其中七星岗遗迹离海岸最远, 离现代岸线已有 100 多公里, 被认

有南面和东面面向大海, 优势波浪多来自东南方向, 而各地全年平均波高又接近东南向波浪的平均波高^[15], 所以用各地全年平均波高代替优势波高进行计算。

古珠江口河口的平均高潮高度无法从实地测量得出, 因此采用吴超羽等人^[13,14]建立的 PRD-LTMM 模型模拟古珠江河口的潮汐变化。PRD-LTMM 是一个建立在水体运动方程和沉积物输运方程基础上, 应用约简技术对模型输入和计算进行处理的千年尺度的长周期动力形态模型, 模型使用正交曲线网格, 空间步长最小为 150 m, 地形改变的分辨率是 10 a^[13,14]。PRD-LTMM 模型已成功地应用于珠江三角洲及河网的形成演变以及广州溺谷湾的形成演变的数值模拟^[13,14]。由于模型在模拟珠江三角洲地形演化时, 必须计算当时的潮汐变化, 所以我们用该模型来计算古海蚀地形所在古海岸的潮汐高度。我们根据各古海蚀遗迹的经纬度用该模型为遗迹所在地点分别输出一个海面高度为 0(相对于当时平均海面)和一个海面高出当时平均海面 1.5 m 的水位时间序列各 30 d, 再从水位序列中计算出各地点 0 和 1.5 m 海面时的平均高潮高度。由于地球自转和月球绕地球公转形成的日周期和月周期是潮汐的最主要周期, 所以用 30 d 为周期进行模拟, 基本能算出主要的高潮和低潮。因为模型计算所考虑的海平面变化是按李平日等人^[22]珠江三角洲 8000 a 来的海平面变化曲线计算的^[13,14,22], 所以这两个海面高度相当于该海平面变化曲线中距今 5000 和 2800 年时的高度。但是, 由于对华南全新世海平面变化有不同的观点, 目前也无法确切知道上述海蚀遗迹的形成年代, 所以这两个海面高度并不一定就是全新世该时段的海面高度, 我们的目的只是利用 PRD-LTMM 模型计算各地点相当于现代海面和高于现代海面 1.5 m 时古海面的平均高潮高度。

Sunamura^[12]根据波浪槽实验数据提出了一个公式, 可计算破碎波高和岩石硬度对海蚀平台的高度的作用:

$$\frac{z_c}{h} = -0.17 \left[5.8 + \ln \left(\frac{\rho g H_b}{S_c} \right) \right], \quad (2)$$

式中, z_c 是静水面下波浪侵蚀的深度(m); H_b 为破碎波高(m); S_c 为岩石的(单轴)抗压强度(MPa); ρ 是海水密度; g 为重力加速度; h 为海蚀平台前水深(water

depth just in front of platforms)。

若两处海蚀平台具有不同高度 z_{c1} 和 z_{c2} , 则两处平台的高差为 $\Delta z_c = z_{c1} - z_{c2}$, 公式(2)变换后可得公式(3)和公式(4):

$$\Delta z_c = -0.17 h \ln \left(\frac{H_{c1}}{H_{c2}} \right), \quad (H_{c2} > H_{c1}) \quad (3)$$

$$\Delta z_c = -0.17 h \ln \left(\frac{S_{c2}}{S_{c1}} \right), \quad (S_{c1} > S_{c2}) \quad (4)$$

式中, Δz_c 为两个海蚀平台的高差(m); H_{c1} 和 H_{c2} 分别为两处海蚀平台的破碎波高(m); S_{c1} 和 S_{c2} 分别为两种岩石的(单轴)抗压强度(MPa); h 为海蚀平台前水深。

由公式(3)和(4)可知, 只要知道 h , 就能计算不同破碎波高或不同岩石造成的海蚀平台高度的差异。广东沿岸各地的破碎波高可由 Komar 和 Gaughan^[23]给出的公式根据各地的平均波高和平均波周期计算得出(表 1):

$$H_b = 0.39 g^{0.2} (TH_0^2)^{0.4}, \quad (5)$$

其中, H_b 为破碎波高, g 为重力加速度, H_0 为深水波高, T 为相应波周期。若将广东沿岸各站平均波高及平均波周期做为深水波高及波周期代入式(5), 可得沿岸各站的平均破碎波高。我们根据广东海岸各地波浪站的平均波高和平均波周期以公式(3)计算广东沿岸因波浪不同造成的现代海蚀平台之间的高度差异^[15]。

我们以公式(4)计算珠江口内两个距离不远, 由不同岩石构成的两个海岛(大虎岛和舢板洲)的现代海蚀平台高度的差异, 其中岩石(变质石英砂岩和砂砾岩)的抗压强度引自文献[24,25]。

根据广东沿海各验潮站不少于连续 20 个年最高潮位值, 按中华人民共和国交通部《海港水文规范(1998)》^[26]中极值 I 型分布律公式计算珠江口(泗盛围、舢板洲)、粤西(烽火角)、粤东(妈屿)海岸特大潮的重现期(妈屿站重现期引自《汕头市城市总体规划》), 用于广东沿岸风暴潮作用高度及有效性的估计。

2.3 其他资料引用

以广东各港口台风风暴潮增水过程资料, 广东海岸各地验潮站和波浪站的潮汐和波浪资料, 香港天文台台风过程风浪资料作为分析计算的部分基础数

据^[9,15,27].

3 测量及计算结果

3.1 珠江三角洲河口湾内外及三角洲平原海蚀平台高度

西冲湾 4 级平台相对于当地平均海面的实测高度分别为-0.7, 0.8, 2.0 和 3.9 m, 换算成珠江基面高程分别为-0.91, 0.59, 1.79 和 3.69 m(图 3(a)). 第 3 级平台下部颜色深而且有海蚀刻槽与第 2 级平台后缘相接, 平台的上部和表面颜色浅, 说明它不是经常被海水作用. 现代藤壶生长上界位于 2 和 3 级平台之间. 藤壶是生活于潮间带较上部的代表种^[28], 因此, 第 2 级平台为现代海蚀平台. 杨梅坑的第 4 级平台不明显, 其他 3 级平台的高度与平均海面的关系分别为-0.7, 0.7 和 1.6 m, 换算成珠江基面高程分别为-0.91, 0.49 和 1.39 m(图 3(b)). 其第 3 级平台同样是上部和表面颜色浅、下部颜色深, 并有海蚀刻槽与第 2 级平台后缘相接, 现代藤壶生长上限(图 3(b)的 K 箭头)也是位于第二级平台之上、第 3 级平台之下, 说明杨梅坑的第 2 级平台也是现代平台.

图 3(c), (d)分别是珠江口内大虎岛南岸和舢板洲的现代海蚀平台. 舢板洲现代平台颜色深, 高度为 1.0 m(珠江基面), 图 3(c)中 T 箭头所指之处是现代平台蚀余部分, 最高处高度为 2.3 m, 相当于上一级的平台(相当于西冲和杨梅湾的 3 级平台), 但形态不明显. 大虎岛现代平台高度为 0.8 m(珠基), 之上亦有颜色浅的高一级平台, 高度约 2.3 m, 其前海蚀穴底部高度为 3.2 m(图 3(d)). 图 3(e)是大虎岛北岸最大的红树林海湾东北侧海岸的海蚀地形, 其海蚀平台高度大于 2.5 m(珠基), 没有下一级平台, 平台前方红树林树冠高度在 1.73~1.95 m(珠基)之间.

谭惠忠等人^[5]所列广东 67 处海蚀遗迹中, 有 60 处给出了海蚀平台的海拔高度(黄海零点), 高度最低为 1.5 m, 最高为 5.6 m, 其中 48 处平台海拔高度在 3 m(珠基 2.41 m)以上. 与上述实测平台高度对比, 这些平台明显高于现代海面高度条件下现代海蚀平台应有的高度. 但谭惠忠等人^[5]所列的大部分高程数据来源于大比例尺地形图, 而非精确的水准测量. 表 2 列出了 4 处现代三角洲平原上做过水准测量或(全站仪)三角高程测量的古海蚀平台高度(广州七星岗、南海小虎岛、增城倚岩寺、中山黄圃), 分别为 2.80, 2.7, 3.19 和 3.47 m(黄海高程), 换算为珠基高程分别为

2.21, 2.11, 2.6 和 2.88 m(表 2).

从上述测量结果可知, 珠江河口内外现代海蚀平台高度 ≤ 1 m, 而且均存在比现代海蚀平台高一级的古平台, 高度皆在 2 m 以上, 与珠江三角洲平原上的古海蚀平台高度相近.

3.2 古今潮汐高度对海蚀平台高度的影响

以广东现代海岸各潮站平均高潮高度(图 2)代入上述罗章仁的经验公式, 并代入不同的波高值(0.5~3 m), 可计算出的广东沿海现代海蚀平台的可能高度或理论高度(图 4 中斜线上的每个点代表图 2 中平均高潮高度所对应的潮站, 其中闸坡站的潮高基面为假定基面, 不计算在内). 由于广东大部分海岸平均波高多在 1 m 以下(表 1), 若以此作为优势波高计算, 则现代海面条件下, 大虎岛和舢板洲海蚀平台高度为 1.15 m, 西冲和杨梅坑平台高度为 0.69 m, 计算结果非常接近现代海蚀平台的实际高度. 从图 4 可见, 若以优势波高 1 m 计算, 广东海岸(包括珠江口)各地平均高潮条件下的海蚀平台理论高度最高不超过 2 m(珠江基面). 大虎岛北岸高位海蚀平台(>2.5 m, 珠江基面)高于其下生长的红树林树冠(图 3(e)), 说明现代海面不能经常到达这样的高度^[29], 现代海岸动力作用不到高位海蚀平台.

从 Google Earth 上测出珠江三角洲平原上海蚀遗迹的经纬度, 将海蚀遗迹所在位置距今 5000 年时 0 m 的海面高度和 2800 年时高于现代海面 1.5 m 的海面高度代入 PRD-LTMM 模型, 计算古三角洲河口相对于当时海面的平均高潮位(见表 3). 其中, 按 PRD-LTMM 模型计算, 中山黄圃在距今 2800 年时已接近成陆, 因此没有完整潮差数据输出. 如表 3 所示, 古珠江河口湾(相对于当时平均海面)的平均高潮高度小于现代珠江河口湾海面的平均高潮高度(0.6 m), 两者虽然有差异, 但相差不大, 说明即使海湾面积大小有变化, 海面高度有变动, (高于当时海面的)平均高潮高度也不会有太大变化, 其差异最大不超过 0.3 m.

利用不同的波高值(0.5~3 m)和表 3 中不同时期的平均高潮高度代入罗章仁经验公式可推算出各处古海蚀平台高于当时海面的可能高度(图 5). 如果珠江三角洲河口湾内的波高不超过 2 m, 则各处古海蚀平台的高度不超过当时海面 1.5 m, 若以广东大多数海岸平均波高不超过 1 m 计算, 则平台高度不高于当时平均海面 1 m(图 5). 因此, 如果没有海面变化和构造变动的影响, 古今海蚀平台高度不会因珠江三



图3 珠江口内外现代海蚀平台实测高度(珠基)
(a) 西冲湾; (b) 杨梅坑; (c) 舢板洲; (d)和(e) 大虎岛

表 2 广东部分古海蚀平台海拔高度(黄海零点)

地点	海拔高度(珠基高程)*(m)	测量方法	数据来源	高度计算方法
广州七星岗	2.80(2.21)	水准测量	文献[6]	平台中部偏上高度**
南海小虎	2.7(2.11)	三角高程测量	本文	多个平台平均高度
增城倚岩寺	3.19(2.60)	三角高程测量	本文	多个平台平均高度
中山黄圃	3.47(2.88)	三角高程测量	本文	多个平台平均高度

*, 1956 年黄海高程-0.586 m=珠江基面高程. **, 内缘高度 3.01 m, 下缘高度 2.53 m(黄海高程)

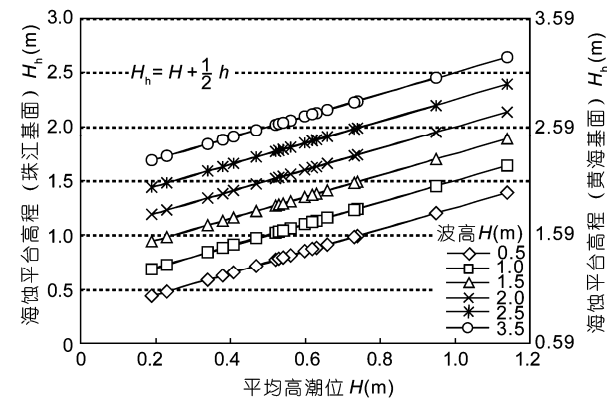


图 4 根据广东沿海各地平均高潮高度以及不同波高计算的现代海蚀平台的可能高度

表 3 距今 5000 年和 2800 年时古珠江河口湾的平均高潮位(单位: m)

地点	5000 a (0 m 海面)	2800 a (1.5 m 海面)
广州七星岗	0.39	0.48
增城倚岩寺	0.4	0.51
南沙小虎岛	0.38	0.5
中山黄圃	0.34	—

角洲形成过程中产生的潮差或平均高潮高度变化而有太大差别, 其差异远小于珠江三角洲古今海蚀平台的实际高度差异. 因此, 古今海湾平均高潮高度的变化也不是古今海蚀平台高度差异的原因.

为了进一步认识潮汐的影响, 我们还模拟了现代珠江河口内大虎岛和舢板洲岛距今 5000 年和 2800 年时的平均高潮高度, 并与现代珠江河口(舢板洲站)平均高潮高度(0.6 m)对比(表 4). 模拟结果表明, 大虎岛和舢板洲水域从 5000 年前至今, (随着珠江三角洲发育和河口湾变窄)平均高潮高度逐渐变大, 但舢板洲站古今平均高潮高度相差不足 0.2 m. 如果没有海面 and 构造的变动, 当珠江三角洲继续扩展, 岸线延伸到舢板洲岛以外时, 舢板洲岛就成为三角洲平原上的丘陵, 它的现代海蚀平台(现代高度约 1 m)就成了海蚀遗迹, 其高度不可能高出海面 2 m 以上.

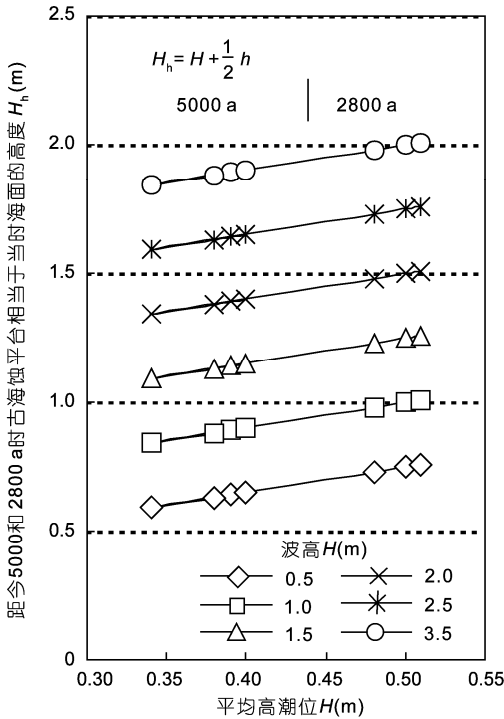


图 5 据不同波高计算的古海蚀平台的可能高度

表 4 5000 年以来大虎岛和舢板洲岛平均高潮位高度的变化(单位: m)

年代	5000 a	2800 a	0 a
大虎岛	0.38	0.53	0.6
舢板洲	0.42	0.47	0.6

3.3 波浪(破碎波高)和岩石硬度对海蚀平台高度的影响

尽管以罗章仁公式算出的广东海岸现代海蚀平台的高度非常接近实际高度, 但各地现代海蚀平台之间的实际高度仍有一定的差异. 波浪强度和岩石硬度是影响浪蚀平台高度的两个最主要因素^[12]. 为了应用 Sunamura^[12]的公式计算广东沿岸各地波浪差异造成的影响, 先根据公式(5)计算沿岸各波浪站的平均破碎波高(表 5). 由表 5 可见, 各站破碎波高范围在 0.28~1.34 m 之间, 最小破碎波高与最大破碎波

表 5 广东沿海平均破碎波高

	云澳	表角	遮浪	大亚湾	荷包	铜鼓湾	闸坡	水东	碙洲
破碎波高(m)	0.98	1.24	1.34	1.04	1.31	0.80	0.28	0.76	0.95

高之间比值为 0.21. 将广东沿岸的破碎波高代入公式(3), 可得在不同 h 值条件下, 因沿岸各地波高差异造成的海蚀平台高度差异(图 6). 在广东沿岸波浪条件下(最大破波比=0.21), $h=1$ 时, 两处海蚀平台高度差异(Δz_c)不足 0.3 m, $h=2$ 时, Δz_c 不足 0.6 m, $h=4$ 时, Δz_c 才稍大于 1 m(图 6).

大虎岛和舢板洲海岸岩石分别为白垩系红色砂砾岩和寒武系轻变质石英砂岩, 但两者同在珠江口内, 相距约 12 km, 潮汐和波浪条件大致相同, 所以我们以 Sunamura^[12]公式计算因大虎岛和舢板洲岛岩石的不同造成的现代海蚀平台高度差异(图 7). 根据资料, 构成丹霞地形的白垩系红色砂砾岩抗压强度为 69.20~171.70 MPa^[24], 而石英砂岩抗压强度为 150~249 MPa^[25]. 由于岩石抗压强度值离散程度较大^[25], 分别取其中值进行计算较为合理(120.45 和 199.5 MPa), 但考虑到舢板洲的石英砂岩已有轻度变质, 计算时取最高值 249 MPa, 因此得 $S_{c1}/S_{c2}=0.484$.

波浪在波高与水深大致相同时破碎, 所以可用破波高 H_b 代替平台前水深 h , 即 $H_b=h$ ^[10,12]. 若以破碎波高等于 1 m 计算, 两者间高度差异为 0.12 m, 破碎波高为 3 m 时, 两者的差异也不过为 0.37 m, 破碎波高为 7 m 时, 两者的差异也不过超过 1 m. 若破碎波高以 1 m 计算, 两种岩石强度即便相差 10 倍(即 $S_{c1}/S_{c2}=0.1$), 其高度差异(Δz_c)不会超过 0.5 m, 若破碎波高以 3 m 计算, 相差 10 倍的岩石硬度造成的高度差异(Δz_c)也不超过 1.2 m(图 7). 珠江口海岸破碎波高约 1.3 m, 由岩石不同造成的大虎岛和舢板洲上现代平台间的高度差异为 0.16 m, 不超过 0.2 m(图 7).

计算结果表明, 珠江三角洲内外古今海蚀平台的高度差异远远大于波浪和岩石不同所能造成的高度差异.

3.4 风暴潮及台风浪对海蚀平台高度的影响

图 8 是广东沿海几次风暴潮的过程线^[9], 从风暴

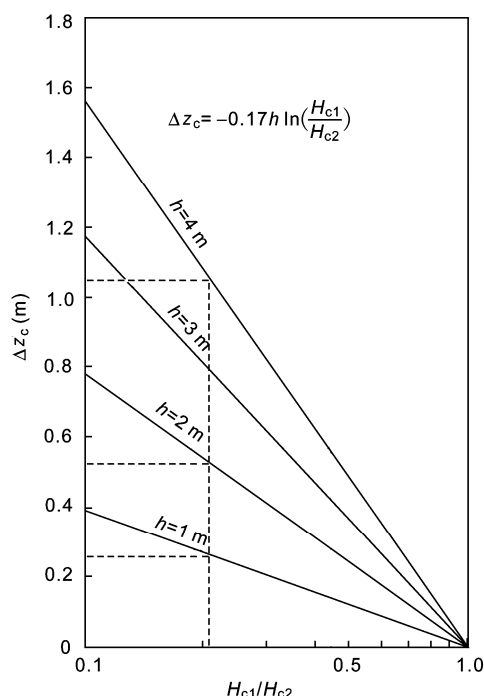


图 6 不同破碎波高对海蚀平台高度的影响

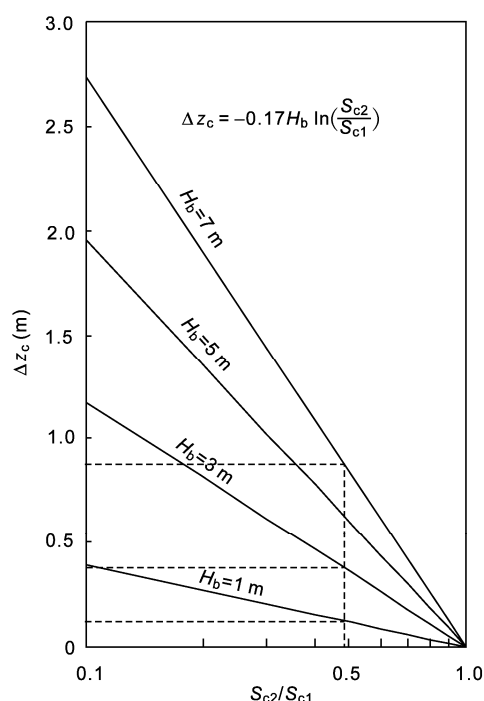


图 7 不同岩石抗压强度对海蚀平台高度的影响

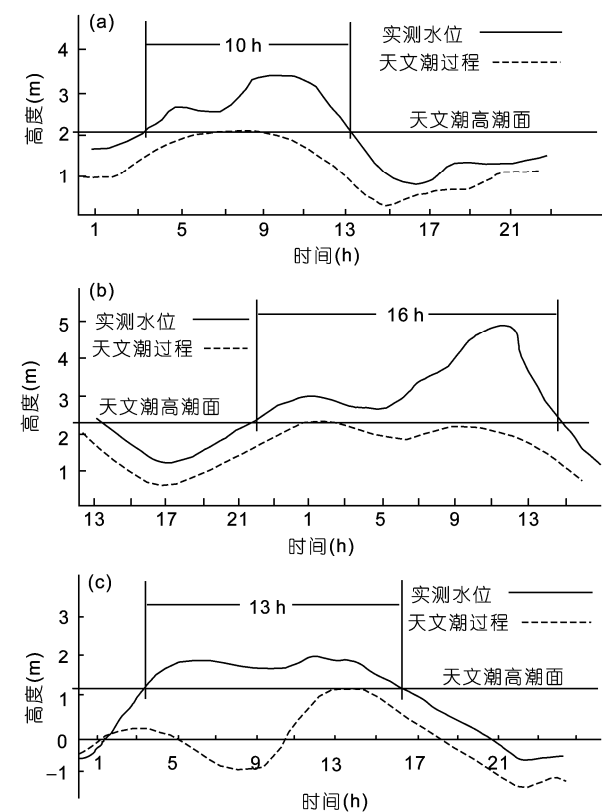


图 8 风暴过程中增水历时

(a) 汕尾 7114 号台风; (b) 汕头 6903 号台风; (c) 黄埔 6411 号台风

过程的水位变化可以算出，每一次风暴潮过程高于正常天文潮高潮位的时间(历时)最多也就只有十几个小时，更高的水位则历时更短(图 9)。

最高潮位是指历史上曾经观测到的潮位最高值^[9]。广东大部分海岸平均高潮位不超过 1 m(珠江基面)，但最高潮位高度往往是几倍于平均高潮位(图 2)。表 6 是珠江口以西(广海湾烽火角站)、珠江口以东(妈屿岛站)、珠江口内(舢板洲站和泗盛围站)极端潮位高度及重现期。计算结果表明，广东各地海岸高于 3 m 的潮位(珠江基面)，至少要 50 年才有一次(表 6)。

表 6 广东沿岸极端潮位高度(m)与重现期(a)

	1000(0.1)	500(0.2)	200(0.5)	100(1)	50(2)	20(5)	数据年限
烽火角	3.88	3.68	3.42	3.22	3.00	2.73	1965~2004
舢板洲	3.25	3.10	2.87	2.73	2.58	2.37	1967~1986
泗盛围	2.98	2.89	2.77	2.67	2.58	2.45	1964~1987
妈屿*	—	—	3.46	3.08	2.71	2.22	1955~1985

* 据汕头市城市总体规划(2002~2020 年)，原数据无重现期 1000 和 500 a 的潮位高度；括号中数字为特大潮位年频率 P(%)

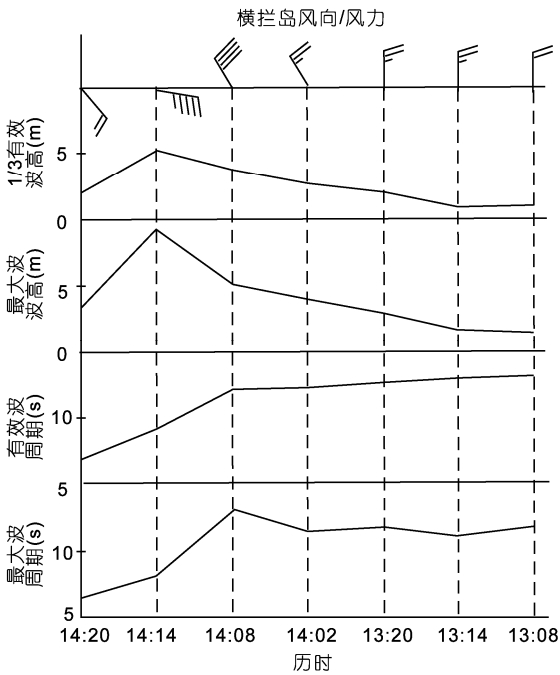


图 9 香港横栏岛记录 1975 年 10 月台风 Elsie 过境期间风向、风力、波高、波周期变化过程

数据来源：香港天文台

每年大约有 20 个台风在西太平洋包括南海海域生成，但只有 6% 的台风接近珠江口并产生一定程度的影响，即便如此，珠江口海区岛屿及附近区域已经是广东沿海风暴潮比较严重的地区之一了^[30]。根据资料记载，在 1848~1949 的 100 年间，该海区遭受风暴潮位 2 m 以上的台风灾害约 60 次，平均不到一年一次^[30]。

图 9 是香港横栏岛记录 1975 年 10 月台风 Elsie 过境期间风向、风力、波高、波周期等要素变化过程^[27]。在图中可以看出，香港时间 13 时 14 分之前，海况平静，随台风 Elsie 接近香港，波浪增大，台风浪最强时，最大波高约 9 m，1/3 有效波高超过 5 m，但超过 5 m 的最大波高和超过 3 m 的 1/3 有效波高的历时不足 20 min。可见，即便在台风过境期间，极大

波浪出现的历时也非常短(图 9). 因此, 波高很大的特大波浪不是经常出现的。

破浪对基岩海岸侵蚀作用最强, 但太大的波浪不一定能对海蚀崖产生侵蚀作用, 因为, 大的波高就要有大的破碎深度, 如果水深不够, 波浪就要在离岸较远(深)的地方破碎, 波浪破碎后再前进到海蚀崖时, 侵蚀能力就会减弱^[1,3,11]. 所以, 大波浪必须要在大的水深(高潮位)条件下才会对海蚀崖产生大的侵蚀作用。

风暴潮期间产生的增水高度当然可以使大波浪作用在远高于平均高潮位的高度上, 但风暴过程中最大水位值的出现是天文潮变化过程与风暴增水变化过程随机组合的结果^[9], 只有天文大潮最大值和特大台风暴潮增水最大值同时出现时, 暴潮波浪才会作用在较高的位置上, 这是小概率事件. 如上述, 广东各地海岸高于 3 m 的潮位(珠江基面), 至少要 50 年才有 1 次(表 6), 加上风暴潮过程中出现高于正常高潮的水位历时很短(图 8), 台风过境时的特大风浪历时也很短(图 9), 因此, 特大的风暴潮波浪很难经常地作用在很高的位置上. 几十年一遇的特大高潮和出现频率极低的特大波浪没有足够的时间塑造出所谓的高位海蚀平台和海蚀穴。

4 讨论

通过各种计算和对比可以看出: (1) 尽管珠江口内外现代海蚀平台实测高度间存在一定的差异, 但这些差异与珠江三角洲古海蚀平台和现代海蚀平台之间实测高度的差异完全不在同一数量级上, 古海蚀平台高出现代海蚀平台许多(图 10); (2) 根据经验公式计算得出的现代海蚀平台高度与其实测高度非常接近, 而古海蚀平台的实际高度与其计算得出的高度差异非常大(图 10); (3) 多处现代海蚀平台之上均有高一级的古海蚀平台, 其高度与三角洲平原上残留的古海蚀平台高度相近(图 10). 这一切都说明古海蚀平台的高度已超出现代海面的动力作用范围。

换言之, 珠江三角洲大部分古海蚀遗迹只能是构造抬升或海平面下降的结果. 尽管有文献认为珠江三角洲平原上的古海蚀地形位于三角洲边缘的构造抬升区, 所以其平台高度较高^[20], 然而, 我们的研究发现, 位于现代珠江三角洲中心的现代岛屿(如

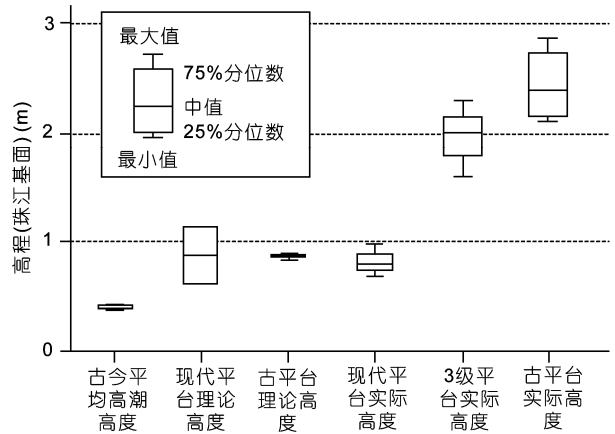


图 10 平均高潮高度与各种海蚀平台高度范围

大虎岛)上不足 1 m 的现代平台之上恰恰就有 2 m 以上的海蚀平台和海蚀穴, 而这些平台或海蚀穴的高度与珠江口以东大鹏半岛现代海岸上的 3 级平台的高度是一致的, 而且与珠江三角洲平原上的古海蚀平台高度是属于同一数量级的(图 10). 就目前所得数据而言, 从古三角洲顶端到现代海岸有如此一致的古海蚀平台高度是构造抬升还是海平面下降的结果, 还很难下结论. 所以, 准确地鉴别构造的作用, 还原海面下降幅度, 还需要更进一步的研究. 然而, 由于地壳的各种均衡作用, 要寻找一个全球统一的海平面是不可能的^[31], 但是求出局部的相对海面变化是可行的, 也是有必要的, 否则海平面变化的研究将变得毫无意义。

5 结论

本文从海岸地貌学、海岸动力学、岩体力学等几个方面对珠江三角洲古今海蚀地形的高度及影响因素进行研究, 得出以下结论:

- (1) 珠江三角洲古海蚀平台高出海面 2 m 以上, 现代海蚀平台高度 ≤ 1 m. 两者高度差异在 1 m 以上;
- (2) 古今珠江三角洲河口湾内潮汐(平均高潮)高度的最大差异不超过 0.3 m, 不是形成古今海蚀地形高度差异的主要原因;
- (3) 广东沿岸波浪差异造成的海蚀平台之间的高度差异不超过 0.3 m, 远小于珠江三角洲古海蚀平台和现代海蚀平台之间的高度差异;

(4) 珠江口内海岸不同岩石类型造成的海蚀平台之间的高度差异不超过 0.2 m, 也远小于珠江三角洲古海蚀平台和现代海蚀平台之间的高度差异;

(5) 广东各地海岸高于 3 m(珠江基面)的风暴潮, 至少要 50 年才有一次, 几十年一遇的特大高潮和出现频率极低的特大波浪没有足够的时间塑造相应的

高海蚀平台和海蚀穴, 因此, 珠江三角洲古海蚀遗迹不是风暴潮波浪作用的结果;

(6) 珠江三角洲古海蚀遗迹高度已超出现代海面动力的作用范围, 只能是构造抬升或海平面下降的结果, 但如何准确地鉴别构造的作用, 还原海面下降幅度, 还需要进一步的研究.

致谢 华南师范大学地理科学学院温小浩、牛东风、王世峰、吴雯、唐洪城、刘愠等参加了野外工作, 在此一并致谢.

参考文献

- Stephenson W J. Shore platforms: A neglected coastal feature? *Prog Phys Geogr*, 2000, 24: 311–327
- Rust D, Kershaw S. Holocene tectonic uplift patterns in north eastern Sicily: Evidence from marine notches in coastal outcrops. *Mar Geol*, 2000, 167: 105–1261
- Sunamura T. *Geomorphology of Rocky Coasts*. Chichester: John Wiley & Sons, 1992
- 吴正. 南海北部晚更新世以来的海平面变化. *热带地貌*, 1985, 6: 8–18
- 谭惠忠, 李平日, 李孔宏. 广东历史时期海平面变化的岸线记录研究. *热带地貌*, 1995, 18: 132–140
- 黄进, 黄广耀, 丘燕昌. 七星岗南麓古海蚀平台高程的测定. *热带地貌*, 2007, 28: 19
- 黄进. 七星岗南麓的海蚀平台不能作为地壳抬升的证据. *热带地貌*, 1987, 8: 65–67
- 王珂. 小虎岛红层古海蚀地貌的初步研究. *热带地貌*, 1995, 16: 115–121
- 王超. *海洋工程环境*. 天津: 天津大学出版社, 1988. 149–160
- 常瑞芳. *海岸工程环境*. 青岛: 青岛海洋出版社, 1997. 75–76
- 罗章仁. 沙角地区的现代浪蚀地貌断面的初步研究. *中山大学学报*, 1984, 3: 23–26
- Sunamura T. The elevation of shore platforms: A laboratory approach to the unsolved problem. *J Geol*, 1991, 99: 761–766
- 吴超羽, 包芸, 任杰, 等. 珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析: 距今 6000~2500 a. *海洋学报*, 2006, 28: 64–80
- 韦惺, 吴超羽, 任杰, 等. 6 ka 以来广州溺谷湾形成演变的数值模拟和地貌动力学分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1384–1395
- 黄方, 叶春池. *广东海岛海洋水文*. 广州: 广东科技出版社, 1995. 10–77
- 曾昭璇, 黄伟峰. *广东自然地理*. 广州: 广东人民出版社, 2001. 58–59
- 国家海洋局, 国家测绘局. *中国海岸带和滩涂资源综合调查图集广东省珠江口分册*. 广州: 广东省地图出版社, 1989. HA43-HA44 5(1)
- 地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组. *深圳市区域稳定性评价*. 北京: 地质出版社, 1991. 140
- 王为, 曾昭璇, 吴正, 等. 广东中山黄圃镇海蚀遗迹的形成年代及古地理环境. *地理研究*, 2005, 24: 919–927
- 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变. 广州: 科普出版社广州分社, 1982. 40–55, 158–163
- Monkhouse F J. *Principles of Physical Geography*. London: Hodder and Stoughton, 1975. 280–321
- 李平日, 乔彭年, 郑洪汉, 等. 珠江三角洲一万年来环境演变. 北京: 海洋出版社, 1991. 59–68
- Komar P D, Gaughan M K. Airy wave theory and breaker height prediction. In: *Proc 13th Coast Eng Conf*, 1972. 405–418
- 朱诚, 彭华, 李中轩, 等. 浙江江郎山丹霞地貌发育的年代与成因. *地理学报*, 2009, 64: 21–32
- 刘佑荣, 唐明辉. *岩体力学*. 北京: 中国地质大学出版社, 1998. 57–67
- 交通部第一航务工程勘察设计院. *海港水文规范 JTJ213-9*. 北京: 人民交通出版社, 1998. 6–9
- Cheng Tze-shan. Tropical cyclone wave statistics at Waglan Island, Hong Kong. *Royal Observatory, Hong Kong Technical Note (Local)*. 1986, 37: 51–74
- 沈国英, 施并章. *海洋生态学*. 北京: 科学出版社, 2002. 310–312
- 张乔民, 于红兵, 陈欣树, 等. 红树林生长带与潮汐水位关系的研究. *生态学报*, 1997, 17: 258–265
- 李平日, 黄光庆, 王为, 等. 珠江口地区风暴潮沉积研究. 广州: 广东科技出版社, 2002. 21–23
- Pirazzoli P A. *Sea-level Changes—The Last 20000 Years*. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. 11

Factors affecting the heights of ancient and present wave-cut benches in the Pearl River Delta area

WANG Wei¹, WU ChaoYu², XU LiuBing¹, WEI Xing² & HUANG Shan¹

¹ *Geography and Quaternary Environment Institute, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;*

² *Center for Coastal Ocean Research, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China*

The height of marine wave-cut benches and notches is an indicator of the sea level because they are formed by long-term wave action. Although ancient wave-cut benches on the Pearl River Delta plain have heights much higher than those of benches developed on the modern coasts, the heights of the old benches are still widely considered to be within the range of modern wave actions. They are therefore used as indicators of Holocene tectonic uplift or sea level changes in the Pearl River Delta area. In this study, we address the coastal geomorphological, hydrodynamic and rock mechanical factors affecting heights of wave-cut benches. Field surveys showed that the ancient benches on the Pearl River Delta plain are >1 m higher than modern ones developed on coasts within and beyond the current Pearl River estuary firth. We calculated that the difference between ancient and modern mean high tide levels in the Pearl River Delta was no more than 0.3 m. Both of the differences between wave-cut bench heights induced by different wave heights and by differential coastal rock hardness were also no more than 0.3 m. Therefore, these are not influential factors regarding the differences in heights between ancient and current wave-cut benches. Tidal statistics indicate that 3 m-high storm surges occur at least every 50 years, but these cannot explain the high-level benches. The levels of old marine benches have ascended beyond the range of modern wave actions, and are likely the result of structural uplift or sea level fall.

wave-cut bench, influence factor, Pearl River delta

doi: 10.1360/972010-1035