

刘桢峤, 周亮, 高抒. 基于地面 3D 激光扫描技术的海南岛南部海岸巨砾沉积研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(11): 127–141, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.11.012

Liu Zhenqiao, Zhou Liang, Gao Shu. Application of the terrestrial laser scanner to the coastal boulders on the southern coast of Hainan Island[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(11): 127–141, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.11.012

# 基于地面 3D 激光扫描技术的海南岛南部 海岸巨砾沉积研究

刘桢峤<sup>1</sup>, 周亮<sup>1</sup>, 高抒<sup>1\*</sup>

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 海岸巨砾沉积是反映海岸极端波浪事件活动历史的重要载体, 对于预测未来海洋极端水文灾害发生趋势具有重要意义。本文基于地面 3D 激光扫描技术, 以海南岛南部海岸大东海和小东海的海岸珊瑚巨砾沉积为研究对象, 使用了 Riegl VZ4000 地面 3D 激光扫描仪精确测量了这些珊瑚巨砾的体积参数, 结合水文模型计算出搬运这些巨砾所需的临界起浪波高和流速, 重构了极端波浪事件强度, 并根据沉积学和动力学对海岸珊瑚巨砾的沉积成因进行了分析。结果表明, 地面 3D 激光扫描技术与传统测量方式相比, 具有方便、快速、高精度的优势。海南岛大、小东海堆积的珊瑚巨砾沉积是由台风波浪破碎珊瑚礁平台前缘并将碎块运输到礁平台而成的, 且台风的最大强度可能接近超强台风“宝霞”。本研究可为重建南海地区古风暴活动历史, 揭示该地台风活动规律以及海岸极端波浪灾害的防风减灾工作提供重要科学参考信息。

**关键词:** 海岸珊瑚巨砾; 海洋极端水文事件; 3D 激光扫描; 珊瑚礁海湾; 海南岛

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)11-0127-15

## 1 引言

21 世纪以来, 台风和海啸等极端波浪事件及其引发的一系列海洋灾害给全球沿岸地区带来了巨大生命财产损失和社会危害, 如 2013 年超级台风“海燕”横扫菲律宾, 造成了高达 20 亿美元的经济损失和至少 6 300 人死亡的巨大灾难<sup>[1]</sup>。在全球的海平面不断上升<sup>[2]</sup> 以及海岸带快速城市化<sup>[3]</sup> 的背景下, 研究类似海岸极端波浪事件发生的频率并且预测其未来的变化趋势, 已成为迫切需要解决的问题, 这对于海岸地区防灾减灾、交通运输和城市规划建设具有重要意义。由于器测资料时间尺度较短的局限性, 无法获知充足的极端波浪事件有效数据, 使得极端波浪事件

(特别是特大极端波浪事件) 发生规律的预测精度存在较大的不确定性, 而利用沉积学和地质学方法, 重构长时间尺度极端波浪事件的变化规律已成为十分可行的选择<sup>[4]</sup>。

海岸巨砾, 通常指在海岸地区极端水文事件作用下, 珊瑚岸礁或砾质海岸被侵蚀形成的巨大钙质(珊瑚礁块)或硅质(基岩岩石)砾石块体。由于海岸巨砾体积和质量巨大, 容易识别且一般无法被波浪潮汐搬运, 所以成为指示海岸极端水文事件的重要沉积记录<sup>[5-6]</sup>。国内外学者基于海岸巨砾沉积运用沉积学、第四纪地质学和地貌学等方法在大西洋沿岸、地中海沿岸、加勒比海、日本、澳大利亚和泰国湾等地区对巨砾的年代、大小、形状、起源及水动力方程展开

收稿日期: 2018-10-22; 修订日期: 2019-01-12。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41706096, 41530962); 河口海岸学国家重点实验室科研业务费(SKLEC-2017RCDW03)。

作者简介: 刘桢峤(1995—), 男, 江苏省江阴市人, 主要从事海岸沉积动力学研究。E-mail: 51173904036@stu.ecnu.edu.cn

\* 通信作者: 高抒, 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积动力学研究。E-mail: sgao@sklec.ecnu.edu.cn

了一系列研究,以期重现古风暴活动历史,在此基础上取得了一些重要认识<sup>[5-12]</sup>。目前使用的数学模型虽然初步实现了风暴事件强度的恢复,但却严重依赖于巨砾测量参数(体积参数和密度)的精确获取<sup>[13]</sup>。

尽管如此,目前对于精确获取巨砾体积参数的研究却仍然开展较少<sup>[12, 14]</sup>。传统的测量方法是进行简单的卷尺测量,但天然巨砾形状往往是不规则的,导致传统方法测量结果误差较大,从而无法准确计算搬运与输移这些巨砾所需的水动力条件,即无法准确恢复极端波浪事件的强度。此外,尽管初期研究认为海岸巨砾都是海啸作用的产物<sup>[15-17]</sup>,但随着观测技术的进步,大量学者发现风暴作用同样具备启动这些海岸巨砾的能力<sup>[10, 18-20]</sup>,近期研究者们通过寻找特定研究地点、数学模型研究、现场观测等方法,致力于准确区分风暴成因巨砾和海啸成因巨砾<sup>[21-22]</sup>,但目前受限于精细体积参数等因素影响,尚未发展出有效的数学模型方法。因此,亟需发展准确测量海岸巨砾体积参数的技术方法,以便为准确地重建极端波浪事件的强度和有效判别海岸巨砾的产生原因。

3D激光扫描技术(Terrestrial Laser Scanner, TLS)是近10年来兴起的一种新型三维数据采集技术,它能够快速获取物体表面每一个采样点的空间位置坐标,获得一个表示实体的点集合,称之为“点云”。基于这些“点云”数据可以进行多种形式的立体模型描述,重建出实体的表面模型<sup>[23]</sup>。无论是规则物体还是不规则物体, TLS技术都可以凭借其强大的技术优势实现物体体积参数和形状信息的精确提取。目前已有学者利用 TLS技术进行了基岩海岸侵蚀<sup>[24]</sup>、河口海岸滩涂地貌演变<sup>[25]</sup>、物理模型上的地形测量等方面的研究<sup>[26]</sup>,而且该技术在海洋、林业、生态等多方面也得到了广泛应用<sup>[27-29]</sup>。

海南岛长期以来是我国受台风影响最为严重的区域,据统计1964–2013年直接登陆海南岛的台风就有87个<sup>[30]</sup>。海南岛生物礁海岸线总长度占总岸线长度过半<sup>[31]</sup>,是我国大陆边缘岸礁的主要分布区,其中海南岛的东岸和南岸发育规模最大,可提供丰富的珊瑚巨砾物质来源,而鹿回头两侧海湾中珊瑚礁发育良好,是我国重要的珊瑚岸礁分布区<sup>[32]</sup>,同时也是国家级珊瑚礁保护区,受人类扰动相对较小。此外该区域历史上鲜有明确的海啸事件文献记载,且受台湾、菲律宾等岛屿的阻隔,太平洋海啸很难对海南岛构成较大威胁。因此,海南岛南部地区是利用珊瑚巨砾沉积进行风暴强度重建研究,以及研究区分台风巨砾与

海啸巨砾的理想地点。

本文拟通过 TLS技术和传统测量方法的对比分析,并对海南岛南部两处海岸珊瑚巨砾沉积进行扫描,进而精确获取巨砾体积参数,以期更为准确地重构影响该地区极端波浪事件的强度,并揭示产生和启动这些巨砾的极端波浪事件的性质(台风或海啸事件)。

## 2 研究区概况

海南岛作为中国第二大岛,位于南海西北部,与雷州半岛隔海相望,岸线长1 725 km,面积33 556 km<sup>2</sup>。海南岛地势中部较高,四周低平,中部最高峰五指山海拔1 879 m,全岛山势走向主要以东北–西南向为主<sup>[31, 33]</sup>。海南岛南部在地质构造上处于琼南断裂带南侧,海岸朝向宽阔海域,岸线崎岖多折。南部处于热带季风气候作用区,气候湿热,年均气温25.4℃,西南季风与东北季风交替作用,年均降水量1 279.3 mm<sup>[33]</sup>。

本研究区为鹿回头半岛东侧榆林湾的小东海和大东海海域(图1)。小东海东西两端为基岩海岸,中部发育有连岛沙坝海岸,向海侧为沙砾质海滩,海滩岸线长约1 340 m,宽约21~27 m,相对高度约3.4 m,坡度7°~10°<sup>[34]</sup>。小东海西南和东北处存在岸礁,正南方无岸礁存在,西南侧岸礁长约1 000 m,向海延伸约250 m,面积约为0.2 km<sup>2</sup>,东北侧岸礁长约700 m,向海延伸约140 m,面积约为0.09 km<sup>2</sup>。大东海东西两侧是基岩岬角海岸,其湾内发育了长300 m,向海延伸约150 m的珊瑚礁平台。破浪侵蚀产生的大量沙砾质泥沙在湾顶堆积,形成沙坝海岸。海滩坡面相对高度约4 m,坡度约6°~10°<sup>[34]</sup>。大、小东海两侧的珊瑚礁平台上均存在大量海岸珊瑚巨砾沉积。

研究区波浪以风浪为主,冬半年近岸平均波高1.3 m,最大波高6.0 m,主要是E或NE向浪;夏半年平均波高0.7 m,最大波高2.0 m,主要是S或SW向浪。

研究区潮型属不正规混合潮型,以日潮为主,平均潮差仅0.88 m,高低潮时差在2 h以内,潮差比率为1.0左右,涨潮历时大于落潮历时。海流以潮流为主,为不规则全日潮流,呈往复流,涨落潮平均流速分别为11.2 cm/s和19.4 cm/s,最大涨潮为NNE–NE向,落潮为SW–SSW向<sup>[34]</sup>。

据统计,1964–2013年登陆研究区的台风总数87个,平均每年登陆个数为1.7个,年登陆频数最多达到5个。在登陆强度分布上,台风级及以上频数为48个,占总登陆频数的54.9%<sup>[30]</sup>。

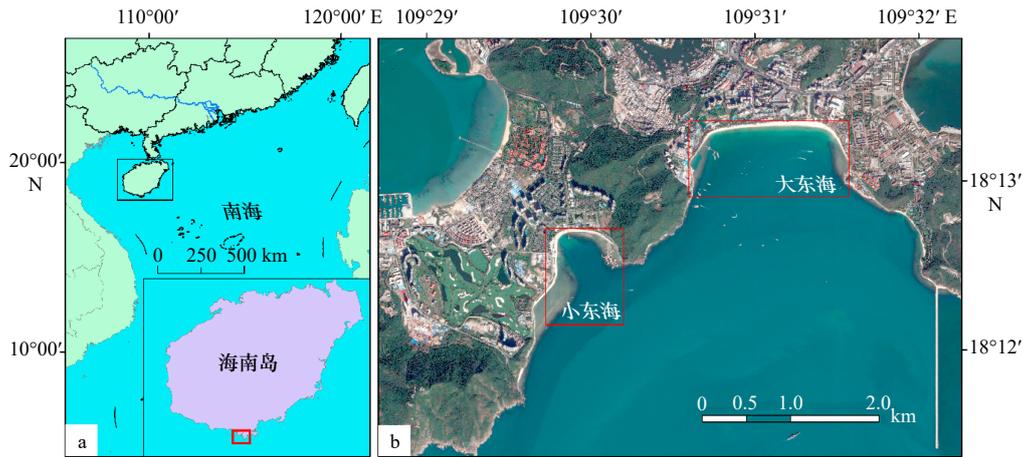


图 1 海南岛南部大、小东海研究地点 (a) 和大、小东海采样位置 (b)

Fig. 1 Study area (a) and research locations (b) of Dadonghai and Xiadonghai in southern coast of Hainan Island

底图来自 Google Earth

The base map is from Google Earth

### 3 材料和方法

#### 3.1 样品采集

2018 年 1 月 31 日至 2 月 3 日, 在海南岛大、小东海的珊瑚礁平台上使用 Riegl VZ4000 地面 3D 激光扫描仪, 共扫描 24 块典型海岸珊瑚巨砾以获取体积参数 (图 2a), 同时使用传统人工卷尺测量的方法对巨砾体积参数进行测定。

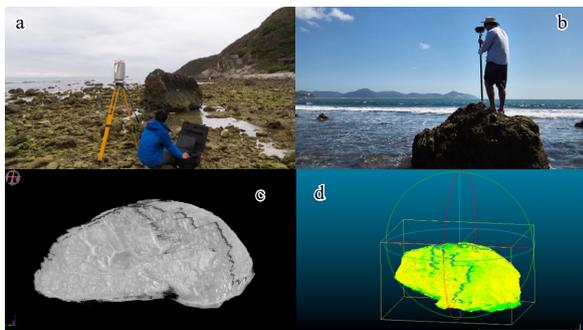


图 2 扫描仪工作 (a); GPS-RTK 工作情形 (b); 3D“点云”模型 (c); 基于 SD 点云数据进行巨砾体积参数计算 (d)

Fig. 2 The terrestrial laser scan (a) and GPS-RTK (b); 3D point cloud model (c); calculation of volume parameters of boulders with 3D view of a cloud of points (d)

##### 3.1.1 扫描仪基本原理与性能指标

Riegl VZ4000 地面 3D 激光扫描仪由奥地利瑞格 (RIEGL) 公司生产, 主要由 3D 激光扫描仪、数码相机、扫描仪旋转平台、软件控制平台、数据处理器与电源等部分构成, 能以不接触被测物体的方式快速扫描目标物体形成高密度、高精度的三维点位。工作

原理为, 扫描仪的激光脉冲二极管发射激光信号, 经过旋转棱镜发射到被扫描目标, 然后激光信号接触目标反射回来被探测器接受并被记录, 最后由处理器转换成可以通过电脑处理的数据, 再经过软件处理实现数据建模。

测量仪器 Riegl VZ4000 的有效扫描距离约为 2 300 m, 精度为 15 mm, 分辨率为 10 mm, 激光波长为近红外, 激光束发散度为 0.15 mrad, 扫描角度范围在垂直方向与水平方向上分别为  $\pm 30^\circ$  与  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 角度步宽在垂直方向与水平方向上分别为  $0.002^\circ \sim 0.280^\circ$  与  $0.002^\circ \sim 3^\circ$ 。

##### 3.1.2 数据采集与处理

选取典型海岸珊瑚巨砾代表, 采用 GPS-RTK 系统准确定位这些海岸珊瑚巨砾的位置, 获取绝对坐标 (图 2b)。同时环绕海岸珊瑚巨砾从不同方位使用 3D 激光扫描仪进行扫描, 一般每块巨砾测量 3~4 个方位, 从而获取完整的实体表面信息。最后将各个测站的数据由相对坐标系统校正到统一的 WGS1984 坐标系统。在使用 TLS 技术的同时, 采用了传统卷尺人工测量了巨砾的体积参数 (a, b, c 轴) 长度。采集完成后通过 3D 激光扫描仪处理软件 RiSCAN PRO 对同一块巨砾不同角度的扫描面进行拼接, 构建出“点云”模型 (图 2c)。然后再将“点云”数据导入到软件 CloudCompare 中, 进行三轴投影并最终计算出巨砾的三轴长度与体积 (图 2d)。

##### 3.1.3 实验室巨砾样品分析

海岸珊瑚巨砾密度的测量, 选取了 10 个典型巨砾, 采用阿基米德排水法, 在每个巨砾上敲取 3~5 块小块, 通过下式计算, 取所有样品的算术平均值作为

本文所有珊瑚巨砾的密度。

$$\rho_s = \rho_w \left( \frac{W_a}{W_a - W_f} \right), \quad (1)$$

式中,  $\rho_s$  为海岸珊瑚巨砾的密度 (单位:  $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_w$  为海水密度 (取  $1.02 \text{ g}/\text{cm}^3$ );  $W_a$  是样品在空气中的质量 (单位:  $\text{g}$ ),  $W_f$  是样品在海水中的质量 (单位:  $\text{g}$ )。首先使用电子天平称量 (精确到  $0.01 \text{ g}$ ) 样品在空气中的质量, 然后在烧杯中注入足量的  $1.02 \text{ g}/\text{cm}^3$  的盐水 (使用海盐和蒸馏水调配而成), 用塑料膜包裹样品悬挂于吊钩秤上, 缓慢置入烧杯直至被完全浸没, 并测得样品在海水中的质量。

### 3.2 水动力方程

#### 3.2.1 与珊瑚巨砾沉积相关的波高计算

Nott<sup>[17, 35]</sup> 提出了区分海啸和风暴潮所能推移的海岸巨砾的水动力方程, 方程引入海岸巨砾的三条轴 ( $a, b, c$  轴) 来刻画巨砾的体积与形状, 同时引入海岸巨砾的体积密度。当一块巨砾受力瞬时发生运动时, 其主要受  $F_d$  (拖曳力),  $F_l$  (升力),  $F_r$  (约束力) 和  $F_m$  (惯性力) 4 种力共同作用。其中

$$F_d = \frac{[0.5\rho_w C_d (ac) u^2] c}{2}, \quad (2)$$

$$F_l = \frac{[0.5\rho_w C_l (bc) u^2] b}{2}, \quad (3)$$

$$F_r = \frac{(\rho_s - \rho_w) (abc) gb}{2}, \quad (4)$$

$$F_m = \rho_w C_m (abc) \ddot{u}, \quad (5)$$

$$u = \delta \sqrt{gH}, \quad (6)$$

式中,  $\rho_w$  为海水密度 (单位:  $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_s$  为海岸巨砾密度 (单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_d$  为阻力系数;  $C_l$  为升力系数;  $a, b, c$  分别为  $a$  轴,  $b$  轴,  $c$  轴长度 (单位:  $\text{m}$ );  $g$  为重力加速度 (单位:  $\text{m}/\text{s}^2$ );  $u$  为波速 (单位:  $\text{m}/\text{s}$ );  $C_m$  为质量系数;  $\ddot{u}$  为瞬时流速加速度 (单位:  $\text{m}/\text{s}^2$ );  $H$  为波高 (单位:  $\text{m}$ );  $\delta$  为波浪类型参数。

Nott<sup>[17, 35]</sup> 后来在原来基础上进一步改进上述方

程, 进一步讨论了巨砾完全淹没状态下的起运搬运情况, 在浅水中部分暴露和镶嵌于海岸平台状态下的搬运情况。

(i) 海岸巨砾原始位置处于浸没状态时, 其起运搬运方程为

$$F_d + F_l \geq F_r. \quad (7)$$

(ii) 海岸巨砾的原始位置处于浅水中部分暴露的状态时, 其起运搬运方程为

$$F_d + F_l + F_m \geq F_r. \quad (8)$$

(iii) 海岸巨砾的原始位置是镶嵌于海岸平台时, 其起运搬运方程为

$$F_l \geq F_r. \quad (9)$$

将上述推导结果整理可得巨砾起运波高的计算公式如表 1 所示。

#### 3.2.2 珊瑚巨砾流速计算公式

Nandasena 等<sup>[13]</sup> 在 Nott<sup>[17, 35]</sup> 的研究基础上将海滩坡度因子加入巨砾起运的模型中, Nandasena 等<sup>[13]</sup> 认为巨砾起运的方式分为 3 种, 分别是推移、滚动和跃移, 同时把 Nott<sup>[17, 35]</sup> 3 种初始位置归纳为两种, 第一种把浸没与暴露的海岸巨砾统称为在地表以上的巨砾, 第二种为镶嵌于海岸平台的巨砾。

Nandasena 等<sup>[13]</sup> 认为当巨砾起运时, 作用在巨砾上的力应该有  $F_d$  (拖曳力),  $F_l$  (升力),  $F_r$  (约束力),  $F_m$  (惯性力) 和  $F_f$  (摩擦力) 5 种力。其中

拖曳力与拖曳力矩为

$$F_d = 0.5\rho_w C_d (ac) u^2. \quad (10)$$

$$M_d = F_d (c/2). \quad (11)$$

升力与升力力矩为

$$F_l = 0.5\rho_w C_l (ab) u^2. \quad (12)$$

$$M_l = F_l (b/2). \quad (13)$$

约束力与约束力矩为

$$F_r = (\rho_s - \rho_w) (abc) g. \quad (14)$$

$$M_r = F_r (b \cos \theta + c \sin \theta) / 2. \quad (15)$$

表 1 巨砾起运的波高

Tab. 1 Wave height required for boulders transportation

初始位置	水动力环境	
	海啸	台风
浸没	$H \geq \frac{a(\rho_s - \rho_w) / \rho_w}{C_d (ac/b^2) + C_l}$	$H \geq \frac{2a(\rho_s - \rho_w) / \rho_w}{C_d (ac/b^2) + C_l}$
暴露	$H \geq \frac{0.5a(\rho_s - \rho_w) / \rho_w - C_m (a/b) (\ddot{u} / g)}{C_d (ac/b^2) + C_l}$	$H \geq \frac{2a(\rho_s - \rho_w) / \rho_w - 4C_m (a/b) (\ddot{u} / g)}{C_d (ac/b^2) + C_l}$
交错镶嵌	$H \geq \frac{0.25a(\rho_s - \rho_w) / \rho_w}{C_l}$	$H \geq \frac{a(\rho_s - \rho_w) / \rho_w}{C_l}$

惯性力与惯性力矩为

$$F_m = \rho_m C_m (abc) \ddot{u}. \quad (16)$$

$$M_m = F_m (c/2). \quad (17)$$

巨砾与底床摩擦力为

$$F_f = \mu_s (F_r \cos \theta - F_l). \quad (18)$$

式中,  $\rho_w$  为海水密度(单位:  $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\rho_s$  为海岸巨砾密度(单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_d$  为阻力系数;  $C_l$  为升力系数;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  分别为  $a$  轴,  $b$  轴,  $c$  轴长度(单位:  $\text{m}$ );  $g$  为重力加速度(单位:  $\text{m}/\text{s}^2$ );  $u$  为波速(单位:  $\text{m}/\text{s}$ );  $C_m$  为质量系数;  $\ddot{u}$  为瞬时流速加速度(单位:  $\text{m}/\text{s}^2$ );  $\mu_s$  为静摩擦系数;  $\theta$  为岸坡度。

对暴露于地表以上的巨砾, 当其以滑动方式搬运时, 其起动搬运方程为

$$F_d \geq F_f + F_r \sin \theta. \quad (19)$$

对暴露于地表以上的巨砾, 当其以滚动方式搬运时, 其起动搬运方程为

$$M_d + M_l \geq M_r. \quad (20)$$

对暴露于地表以上的巨砾, 当其以跃移方式搬运时, 其起动搬运方程为

$$F_l \geq F_r \cos \theta. \quad (21)$$

对镶嵌于海岸平台的巨砾, 只有在跃移的情况下才会被搬运, 其起动搬运方程为

$$F_l \geq F_r \cos \theta + \mu_s F_r \sin \theta. \quad (22)$$

将上述推导结果整理可得巨砾起动流速的计算公式如表 2 所示。

表 2 巨砾起动的流速

Tab. 2 Flow velocity required for coral boulders transportation

搬运方式	初始位置	
	地表	交错镶嵌
滑动	$u^2 \geq \frac{2(\rho_s/\rho_w - 1)gc(\mu_s \cos \theta + \sin \theta)}{C_d(c/b) + \mu_s C_l}$	无
滚动	$u^2 \geq \frac{2(\rho_s/\rho_w - 1)gc[\cos \theta + (c/b)\sin \theta]}{C_d(c^2/b^2) + C_l}$	无
跃移	$u^2 \geq \frac{2(\rho_s/\rho_w - 1)gc \cos \theta}{C_l}$	$u^2 \geq \frac{2(\rho_s/\rho_w - 1)gc(\cos \theta + \mu_s \sin \theta)}{C_l}$

## 4 结果

### 4.1 海岸珊瑚巨砾形态参数

本文分别通过 TLS 技术和传统人工测量方法测量了分布在大东海(DDH)和小东海(XDH)珊瑚礁平台上的 24 块海岸珊瑚礁巨砾的体积参数(表 3, 图 3)和相对位置。这些珊瑚巨砾分布在距离珊瑚礁平台前缘 30~120 m 的范围内, 种类以枇杷珊瑚科、褶叶珊瑚科、滨珊瑚科和蜂巢珊瑚科的珊瑚石为主, 且与其下伏的珊瑚礁平台上所述的珊瑚种类都不相同。珊瑚巨砾呈叠瓦状构造, 与下伏地层不整合接触。这些珊瑚巨砾无明显尖锐棱角, 表面常附着有藤壶壳与新生珊瑚。在 24 块巨砾中, 大部分巨砾形状以近长方体与椭球体为主, 有 3 块扇形体的巨砾, 4 块锥体形状的巨砾。大多数珊瑚巨砾  $a$  轴倾向为西北—东南向。

受观测条件限制, 本文在大东海东侧珊瑚礁平台上仅选取最大的 1 块典型海岸珊瑚巨砾, 而在大东海西侧珊瑚礁平台上选取了 4 块最大的海岸珊瑚巨砾,

进行了实地测量研究。从 TLS 技术测量结果可以看出(图 3, 表 3), 大东海两侧海岸珊瑚巨砾  $a$  轴长度介于 1.95~3.59 m 之间, 体积介于 3.44~7.52  $\text{m}^3$  之间, 大东海东侧海岸珊瑚巨砾分布较少且体积参数值普遍较小, 以小于 2  $\text{m}^3$  为主之间, 而大东海西侧的珊瑚巨砾的体积参数明显大于东侧, 西侧的最大海岸珊瑚巨砾  $a$  轴达到 3.59 m, 而东侧的最大珊瑚巨砾  $a$  轴长度仅为 2.32 m。在小东海, 本文选择测量了 19 块最大的典型海岸珊瑚巨砾。从 TLS 技术测量结果来看(表 3), 小东海海岸珊瑚巨砾的  $a$  轴长度介于 1.63~3.47 m, 主要集中在 2.50~3.47 m, 体积主要集中在 3~5  $\text{m}^3$  范围内, 该地点最大珊瑚巨砾的体积达到 10.89  $\text{m}^3$ ,  $a$  轴长度达到 2.94 m, 而最小珊瑚巨砾体积也达到了 2.19  $\text{m}^3$ , 其  $a$  轴长度为 1.63 m。

传统方法的测量结果大体与 TLS 测量结果类似(表 3), 所有珊瑚巨砾的  $a$  轴长度介于 1.56~3.66 m, 体积介于 1.19~11.84  $\text{m}^3$  之间, 大东海西侧整体大于东侧的珊瑚巨砾  $a$  轴长度(2.56 m), 介于 1.95~3.37 m 之间。小东海巨砾  $a$  轴长度介于 1.56~3.66 m, 体积介于 1.19~11.84  $\text{m}^3$  之间, 平均值为 4.21  $\text{m}^3$ 。

表 3 TLS 技术与传统方法测量海岸珊瑚巨砾参数结果对比

Tab. 3 Comparison of parameters, weight estimation and calculation of boulders taking traditional axes and TLS measurements

巨砾编号	a轴长度/m		b轴长度/m		c轴长度/m		$V_1/m^3$	$V_2/m^3$	$D_r/m$	$M/kg$
	TLS	传统方法	TLS	传统方法	TLS	传统方法				
DDHE_01	2.32	2.56	1.76	1.72	1.17	0.81	3.80	1.87	37.39	6 916
DDHW_01	3.59	3.37	2.61	2.24	1.72	1.67	7.52	6.60	46.68	13 686
DDHW_02	2.64	2.92	2.18	2.09	1.45	1.21	5.70	3.87	47.79	10 374
DDHW_03	1.95	1.95	1.92	1.92	1.12	0.72	3.44	1.41	44.67	6 261
DDHW_04	2.80	2.56	2.53	1.92	1.58	1.53	5.79	3.94	63.18	10 538
XDH_01	2.94	3.15	2.58	2.86	2.11	2.51	10.89	11.84	64.58	19 820
XDH_02	1.83	1.75	1.82	1.57	1.18	1.18	2.70	1.70	53.78	4 914
XDH_03	2.15	1.65	1.72	1.49	1.19	1.23	3.50	1.58	46.53	6 370
XDH_04	1.63	1.56	1.34	1.41	1.21	1.03	2.19	1.19	47.59	3 986
XDH_05	1.88	2.88	1.67	1.67	1.22	1.27	3.07	3.20	40.23	5 587
XDH_06	2.53	2.64	2.44	2.33	1.67	1.52	4.74	4.90	31.80	8 627
XDH_07	2.29	1.97	1.85	1.77	1.19	1.36	3.64	2.48	49.24	6 625
XDH_08	2.48	2.54	2.30	1.91	1.51	1.82	3.48	4.62	43.08	6 334
XDH_09	3.47	3.36	1.93	1.80	1.39	1.51	3.56	4.78	57.10	6 479
XDH_10	2.15	2.51	1.91	2.06	1.27	1.42	2.39	3.84	70.63	4 350
XDH_11	2.83	2.77	2.46	2.18	1.64	1.74	5.14	5.50	32.58	9 355
XDH_12	2.48	2.59	2.46	2.14	1.61	1.43	4.63	4.15	37.15	8 427
XDH_1314	3.12	3.66	2.47	2.22	1.17	1.37	5.32	5.83	39.42	9 682
XDH_15	2.61	2.58	2.25	2.14	1.54	1.53	3.97	4.42	57.15	7 225
XDH_16	3.34	3.31	2.23	2.19	1.48	1.47	4.97	5.58	71.94	9 045
XDH_17	2.72	2.62	2.61	1.62	1.61	1.74	5.87	3.87	116.03	10 683
XDH_18	3.10	3.15	2.22	2.31	1.31	1.41	4.22	5.37	84.24	7 680
XDH_19	3.16	3.04	3.02	2.41	1.62	1.33	7.57	5.10	71.97	13 777

注: XDH表示采样于小东海; DDH表示采样于大东海;  $V_1$ 为TLS技术计算的体积;  $V_2$ 为传统方法测量计算的体积;  $D_r$ 为巨砾到珊瑚礁平台前缘的距离;  $M$ 为质量; 其中编号为XDH\_13, XDH\_14的海岸珊瑚巨砾由于层叠堆积在一起无法分离测量, 将其按一块计算。

从空间分布来看(图 3), 小东海最大的巨砾(XDH\_01)在珊瑚礁平台最西南处, XDH\_06 号巨砾距离珊瑚礁平台前缘最近为 31.80 m, XDH\_17 号巨砾距离珊瑚礁平台前缘最远为 116.03 m。同时根据实验室所测巨砾密度的平均值  $1.82 \text{ kg/m}^3$  计算出所有海岸珊瑚巨砾的质量。

## 4.2 海岸珊瑚巨砾形成的动力学分析

### 4.2.1 海岸珊瑚巨砾起动波高

根据 Nott<sup>[17,35]</sup> 数学模型参数研究, 本文对浸没状态下海岸珊瑚巨砾的起动波高, 选择  $C_f=0.178$ ,  $C_d=2$ ; 对靠近海岸水面以上以及交错镶嵌于礁平台的海岸

珊瑚巨砾, 选择  $C_d=1.5$ ,  $C_m=2$ ,  $\bar{u}=1.5 \text{ m/s}$ 。根据以上参数值计算了所有珊瑚巨砾在不同状态和不同极端水文事件条件下的起动波高。

TLS 计算结果(表 4)表明, 假设台风作用下, 海岸珊瑚巨砾在 3 种不同初始状态下的起动波高分别介于 1.08~3.81 m(浸没), 1.11~3.60 m(暴露), 7.18~15.82 m(镶嵌); 在海啸作用下, 海岸珊瑚巨砾在 3 种不同状态下的起动波高则分别介于 0.54~1.91 m(浸没), 0.28~0.90 m(暴露), 1.80~3.95 m(镶嵌)。

比较大东海、小东海两个地点巨砾在 2 种水动力环境下 6 种不同状态下的起动波高, 其标准差分别为

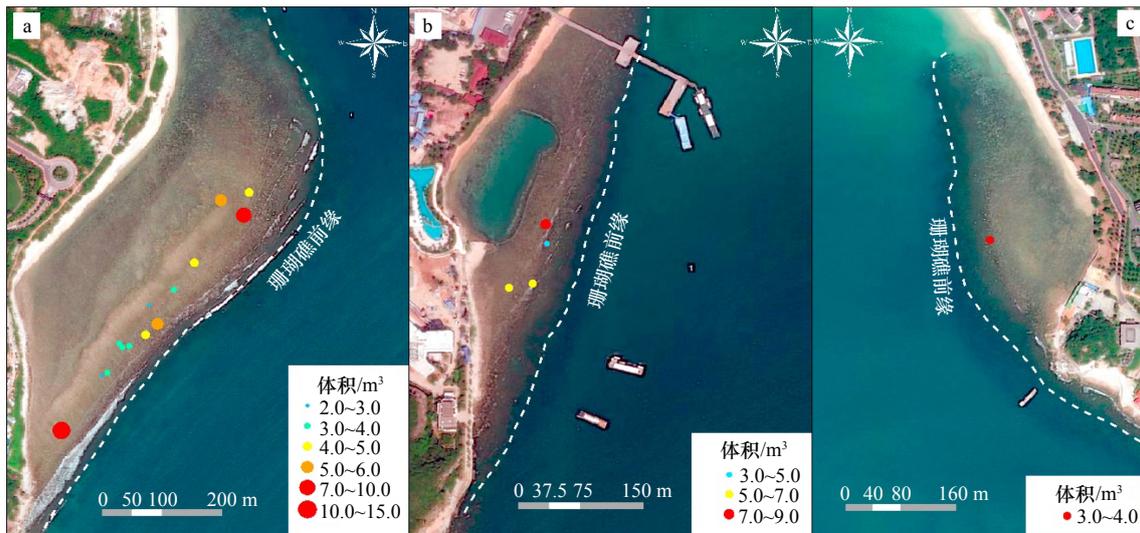


图3 小东海巨砾分布(a); 大东海西侧巨砾分布(b); 大东海东侧巨砾分布(c)

Fig. 3 Distribution of boulders in Xiaodonghai (a), distribution of boulders on the west side of Dadonghai (b), distribution of boulders on the east side of Dadonghai (c)

底图来自 Google Earth

The base map is from Google Earth

表4 海岸珊瑚巨砾起动波高

Tab. 4 Wave height required to coastal coral boulders transportation

巨砾编号	水动力环境	起动波高/m					
		初始状态(浸没)		初始状态(暴露)		初始状态(镶嵌)	
		TLS技术	传统方法	TLS技术	传统方法	TLS技术	传统方法
DDHE_01	海啸	0.94	1.27	0.34	0.45	2.56	2.82
	台风	1.89	2.54	1.36	1.78	10.22	11.28
DDHW_01	海啸	1.41	1.09	0.64	0.46	3.95	3.71
	台风	2.83	2.18	2.57	1.85	15.82	14.85
DDHW_02	海啸	1.16	1.28	0.48	0.52	2.91	3.22
	台风	2.31	2.55	1.92	2.06	11.63	12.87
DDHW_03	海啸	1.12	1.63	0.43	0.61	2.15	2.15
	台风	2.24	3.26	1.70	2.42	8.59	8.59
DDHW_04	海啸	1.41	0.87	0.63	0.34	3.08	2.82
	台风	2.81	1.74	2.50	1.35	12.34	11.28
XDH_01	海啸	1.13	1.17	0.51	0.55	3.24	3.47
	台风	2.26	2.34	2.04	2.21	12.95	13.88
XDH_02	海啸	0.97	0.74	0.35	0.24	2.02	1.93
	台风	1.94	1.48	1.42	0.96	8.06	7.71
XDH_03	海啸	0.88	0.65	0.57	0.20	2.37	1.82
	台风	1.77	1.29	2.29	0.80	9.47	7.27
XDH_04	海啸	0.54	0.68	0.35	0.20	1.80	1.72
	台风	1.08	1.36	1.40	0.79	7.18	6.87

续表 4

巨砾编号	水动力环境	起动波高/m					
		初始状态(浸没)		初始状态(暴露)		初始状态(镶嵌)	
		TLS技术	传统方法	TLS技术	传统方法	TLS技术	传统方法
XDH_05	海啸	0.81	0.75	0.28	0.27	2.07	2.07
	台风	1.62	1.56	1.11	1.07	8.28	8.28
XDH_06	海啸	1.24	1.25	0.54	0.54	2.79	2.91
	台风	2.48	2.50	2.17	2.14	11.15	11.63
XDH_07	海啸	1.01	0.82	0.38	0.30	2.52	2.17
	台风	2.03	1.64	1.51	1.18	10.09	8.68
XDH_08	海啸	1.22	0.73	0.52	0.28	2.73	2.80
	台风	2.44	1.47	2.07	1.13	10.93	11.19
XDH_09	海啸	0.98	0.80	0.38	0.30	3.82	3.70
	台风	1.97	1.59	1.53	1.18	15.29	14.81
XDH_10	海啸	1.01	1.06	0.38	0.43	2.37	2.76
	台风	2.01	2.12	1.53	1.70	9.47	11.06
XDH_11	海啸	1.30	0.98	0.57	0.41	3.12	3.05
	台风	2.59	1.97	2.28	1.64	12.47	12.21
XDH_12	海啸	1.30	1.13	0.57	0.46	2.73	2.85
	台风	2.60	2.26	2.27	1.86	10.93	11.41
XDH_1314	海啸	1.78	1.30	0.78	0.55	3.44	4.03
	台风	3.56	2.59	3.11	2.18	13.75	16.13
XDH_15	海啸	1.16	1.06	0.49	0.44	2.88	2.84
	台风	2.32	2.13	1.95	1.75	11.50	11.37
XDH_16	海啸	1.21	1.18	0.51	0.49	3.68	3.65
	台风	2.42	2.35	2.04	1.97	14.72	14.58
XDH_17	海啸	1.46	0.56	0.65	0.19	3.00	2.89
	台风	2.91	1.13	2.62	0.76	11.99	11.54
XDH_18	海啸	1.33	1.34	0.56	0.57	3.41	3.47
	台风	2.66	2.68	2.23	2.29	13.66	13.88
XDH_19	海啸	1.91	1.52	0.90	0.66	3.48	3.35
	台风	3.81	3.04	3.60	2.64	13.92	13.40

0.29(海啸浸没)、0.14(海啸暴露)、0.58(海啸镶嵌)、0.58(台风浸没)、0.58(台风暴露)、2.33(台风镶嵌),除台风镶嵌状态下的起动波高标准差较大外,其余5种情况在相同水动力环境和相同初始状态下,输运大、小东海的珊瑚巨砾所需起动波高的标准差差异不明显。

从3处地点对比来看,小东海西岸的珊瑚巨砾无

论在数量还是规格,在3处测量区域中均最大。在镶嵌状态下,大东海西岸巨砾的最大起动台风浪波高达15.82 m(DDHW\_01),大东海东岸的珊瑚巨砾平均起动台风浪波高为12.10 m,最大起动台风浪波高为10.22 m(DDHE\_01);小东海珊瑚巨砾的平均起动台风浪波高为11.43 m,最大起动台风浪波高为15.29 m(XDH\_09)。结果表明,榆林湾西岸(小东海西岸与大

东海西岸)的巨砾最大起动波高明显大于大东海东岸巨砾,而在浸没和暴露状态下,3处地点的起动波高则相差不大。而同一块巨砾在相同水动力环境下,浸没、暴露和镶嵌状态下的起动波高差异却较大。具体表现为在海啸情况下,浸没、暴露、镶嵌初始状态下的起动波高基本处于同一量级,其均值分别为1.19 m(浸没)、0.51 m(暴露)、2.87 m(镶嵌);而在台风作用下,镶嵌状态的起动波高大于浸没与暴露的起动波高一个量级,其均值分别为2.37 m(浸没)、2.05 m(暴露)、11.50 m(镶嵌)。同时,在两种不同极端事件水动力环境下,镶嵌状态的起动波高均大于浸没与暴露初始状态的起动波高。

传统方法计算的结果显示,假设台风作用下,海岸珊瑚巨砾在3种不同初始状态下的起动波高分别介于1.13~3.26 m(浸没),0.76~2.64 m(暴露),6.87~16.13 m(镶嵌);在海啸作用下,海岸珊瑚巨砾在3种不同状态下的起动波高则分别介于0.56~1.63 m(浸没),0.19~0.66 m(暴露),1.72~4.03 m(镶嵌)。

比较来看,传统方法的计算结果比TLS的计算结果整体偏小,但两种方法结果的整体趋势和特征较为一致。榆林湾西岸的巨砾最大起动波高同样大于大

东海东岸巨砾;在浸没和暴露状态下,起动波高3处地点同样则相差不大。同一块巨砾在相同水动力环境下,浸没、暴露和镶嵌状态下的起动波高同样差异较大。

#### 4.2.2 海岸珊瑚巨砾起动流速

本研究选择参数  $C_d=2$ ,  $C_f=0.178$ ,  $\mu_s=0.7$  m/s,珊瑚礁平台坡度  $3^\circ$ (GPS-RTK 实际测量),计算得出不同运输模式下起动这些珊瑚巨砾所需要的临界起动流速。

TLS的计算结果表明(图4),本文珊瑚巨砾滑动的平均临界起动流速是4.31 m/s,最大值为XDH\_19的5.04 m/s,最小值为XDH\_04的3.43 m/s;滚动起动的平均临界起动流速是6.31 m/s,最大值为XDH\_19的7.37 m/s,最小值为XDH\_04的4.96 m/s;跃移起动的平均临界起动流速是8.43 m/s,最大值为XDH\_01的10.26 m/s,最小值为DDHW\_03的7.47 m/s;镶嵌跃移的平均起动流速是11.88 m/s,最大值为XDH\_01的14.47 m/s,最小值为DDHW\_03的10.54 m/s。4种初始状态下的起动流速标准差分别为0.38(滑动起动)、0.56(滚动起动)、0.70(跃移起动)、0.98(镶嵌起动)。镶嵌状态下的临界起动流速最大,说明珊瑚巨砾在珊

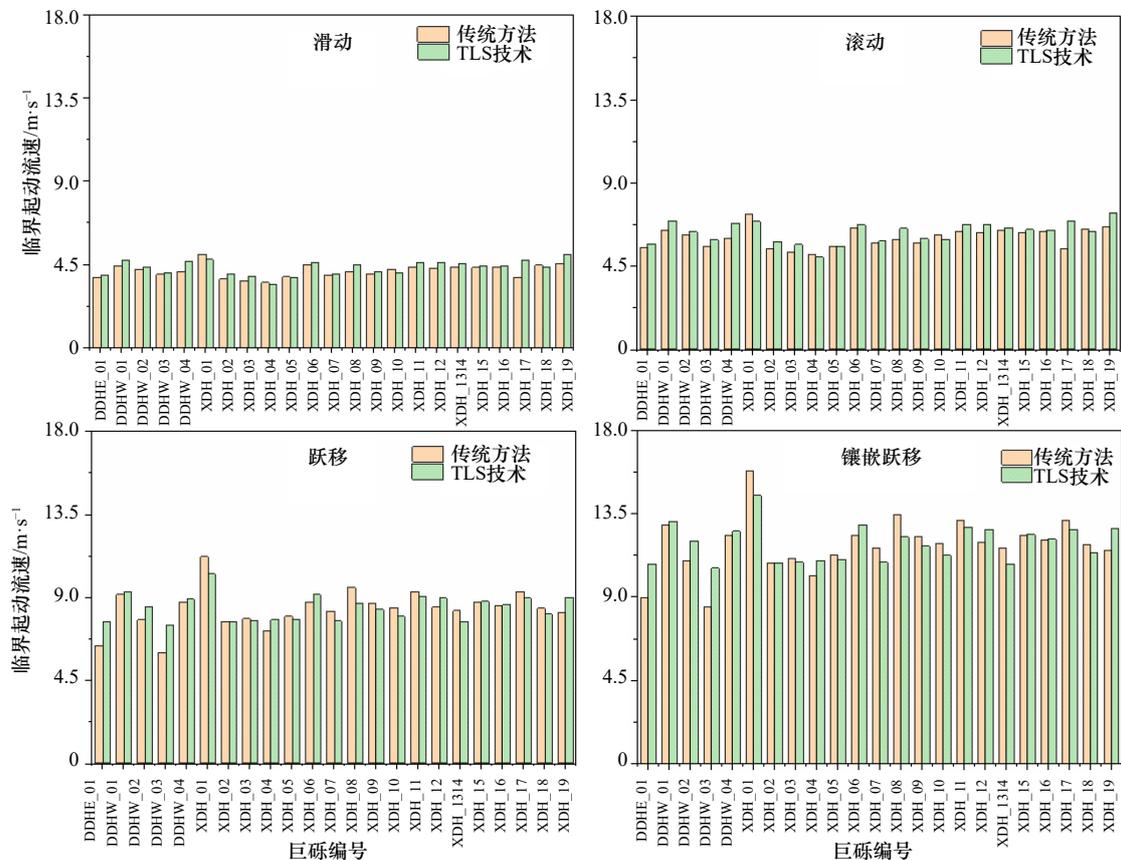


图4 不同运输模式巨砾起动所需流速对比

Fig. 4 Comparison of velocity required for boulder transportation in different transport modes

瑚礁平台破碎分离状态下被起时所需能量更高,而且巨砾的体积越大分离所需的能量越高。

对比大、小东海两处测量地点,大东海东岸的最大珊瑚巨砾 DDHE\_01 的镶嵌跃移起时流速为 10.78 m/s,大东海西岸巨砾的平均镶嵌跃移起时流速为 12.03 m/s,最小起时流速为 DDHW\_03 的 10.54 m/s;小东海西岸巨砾的平均镶嵌跃移起时流速为 11.91 m/s,最小起时流速为 XDH\_1314 的 10.78 m/s。整体来看,在相同初始起时情况下巨砾起时所需的最小流速从大到小依次为小东海、大东海西岸、大东海东岸。

传统方法的计算结果表明(图 4),海岸珊瑚巨砾的起时流速与 TLS 技术所测结果相差较大。滑动起时的平均临界起时流速是 4.13 m/s,最大值为 XDH\_01 的 5.01 m/s,最小值为 XDH\_04 的 3.49 m/s;滚动起时的平均临界起时流速是 6.02 m/s,最大值为 XDH\_01 的 7.26 m/s,最小值为 XDH\_03 的 5.25 m/s;跃移起时的平均临界起时流速是 8.37 m/s,最大值为 XDH\_01 的 11.19 m/s,最小值为 DDHW\_03 的 5.99 m/s;镶嵌跃移的平均起时流速是 11.81 m/s,最大值为 XDH\_08 的 13.44 m/s,最小值为 DDHW\_03 的 8.45 m/s。在滑动起时临界流速和滚动起时临界流速中,传统方法所测结果基本大于 TLS 技术所测结果,但是整体来看,3 处测量地点相同初始情况下,巨砾起时所需的最小起时流速同样从大到小依次为小东海、大东海西岸、大东海东岸。

## 5 讨论

### 5.1 TLS 技术与传统方法的对比分析

起时海岸巨砾的极端波浪事件的强度主要通过计算起时搬运巨砾所需的波高和流速两个指标来衡量<sup>[20,36]</sup>。而精确计算巨砾起时所需的波高和流速,主要取决于巨砾体积参数的准确测量。对比 TLS 技术和传统方法分别测得的珊瑚巨砾体积参数可知(表 3):巨砾的 a 轴测量结果偏差范围介于-14.0%~17.3%之间,b 轴测量结果偏差范围介于-37.9%~10.9%之间,而 c 轴测量结果偏差范围则介于-30.8%~19.0%之间,表明传统测量方法对巨砾体积参数的测量存在很大的误差,而 TLS 技术可以显著提高体积参数的测量精度。同样,使用 TLS 技术和传统方法测量的体积参数计算出极端波浪事件的水动力强度的结果对比显示,TLS 技术呈现明显的优势。以台风影响下处于镶嵌状态巨砾的起时波高和跃移起时流速为例(表 4,图 4):对于这两种状态下的临界起时波高和起时流速,在起时波高中,偏差最小的巨砾为

XDH\_05,偏差为 0,偏差最大的巨砾为 XDH\_03,偏差为-34.8%。在起时流速中,偏差最小的巨砾为 XDH\_08,偏差为-22.4%,偏差最大的巨砾为 DDHW\_03,偏差为 43.3%。由此可见,传统方法获取的体积参数计算结果明显小于 TLS 技术的计算结果,使用传统方法测量的巨砾体积参数来计算的巨砾水动力方程结果与真实值相差较大,无法准确地基于海岸巨砾重构极端波浪事件的强度,这必然对最终结果的定性定量分析造成较大影响。

此外,台风强度还可以通过被极端波浪搬运的巨砾质量大小进行判别<sup>[19,37]</sup>。传统方法通过野外简单测量巨砾 a, b, c 轴的长度,并假定巨砾为长方体或者椭球体等理想几何形状的方式来估算巨砾的体积。标准的椭球体的体积计算公式为  $V = \frac{1}{6}\pi abc$ ,在此基础上依据经验,部分学者通过以 a, b, c 三轴之积乘以一个系数来获取巨砾的体积<sup>[18,38-39]</sup>。但是自然条件下形成的巨砾往往不存在理想的几何形状,这使得传统方法估算的巨砾体积与真实体积之间存在很大的偏差,严重影响了质量计算结果的准确度。从图 5 结果来看,使用 TLS 技术获得的体积( $V_1$ )介于 2.19~10.89 m<sup>3</sup>之间,而以传统方法椭球体体积公式计算的体积( $V_2$ )介于 1.38~8.44 m<sup>3</sup>之间,偏差范围在-36.8%~36.9%之间。以 DDHW\_03 号巨砾为例,在最终的质量计算结果中,使用传统方法测量的体积参数以椭球体计算的质量结果仅为真实值的 41%,准确度很低。

同时,使用传统方法进行巨砾体积参数测量时,受制于地形崎岖或巨砾形状不规则,往往无法使用卷尺准确地测量体积参数,需要多次测量取平均值来减小误差,同时靠人工测量需攀爬巨砾,往往不安全。

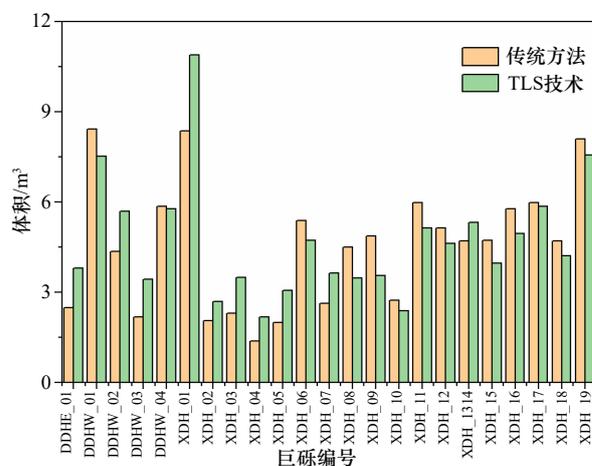


图 5 传统方法和 TLS 技术计算体积对比

Fig. 5 Volume comparison between traditional methods and TLS techniques

运用 TLS 技术则可以解决这些难题, 实现安全和准确的体积参数测量。对于巨砾表面大多呈现不规则形状, TLS 技术则可以凭借其激光反射生成的“点云”快速建模, 完全贴合其原本形状。然而对于年代较为久远的海岸巨砾, 例如珊瑚巨砾常常受到雨水风化侵蚀、波浪的冲蚀和风暴的搬运破碎作用, 随着时间的推移本身体积也会发生明显变化, 这对利用 TLS 技术实现精确的参数测量构成了很大的挑战, 因此今后也需要加强海岸巨砾侵蚀速率的相关研究。此外, 结合地面 3D 激光扫描仪和 TLS 技术的明显优势, 可以在今后的工作中发挥其精度高、速度快、获取数据简便的特点, 尝试开展对其他的海岸线(砾滩、岩滩)等海岸剖面形态、岸线演变等的高精度研究, 可为海岸宏观和微观地貌中的量化研究提供重要的技术支持。

## 5.2 海岸珊瑚巨砾堆积的动力成因: 台风还是海啸?

海南岛大、小东海的海岸珊瑚巨砾沉积在珊瑚礁平台上堆积形态多呈叠瓦状, 且与其下伏地层不整合接触。在物源信息上, 珊瑚巨砾与其下伏珊瑚礁平台都是钙质珊瑚性质, 但是构成珊瑚巨砾的珊瑚品种以枇杷珊瑚科、褶叶珊瑚科、滨珊瑚科和蜂巢珊瑚科的珊瑚石为主, 与珊瑚巨砾下伏礁平台的珊瑚品种不同。因此从珊瑚巨砾的堆积特征可以判定本文研究的礁平台上堆积的珊瑚巨砾沉积是非源地侵蚀产生, 而是由极端波浪事件破碎礁平台前缘或者前缘下部物质并被搬运堆积形成。

在不同极端波浪事件下, 波浪和流速等水动力特征往往存在明显差异, 利用水动力模型恢复海岸巨砾起动水动力特征是识别水动力环境的重要方法之一<sup>[17, 35]</sup>。本文基于 TLS 技术计算得到的巨砾起动波高结果表明, 台风作用下镶嵌的珊瑚巨砾被起动产生的波高介于 7.18~15.82 m 之间(表 4)。前人分别使用了 SWAN 模型与 WAVEWATCH-III 海浪数值模式对于南海台风的模拟研究表明, 海南岛遭受百年一遇的台风有效波高达到 15.71 m 和 18 m<sup>[40-41]</sup>, 均满足本文计算的台风作用下起动波高 15.82 m 的极值。而珊瑚巨砾在镶嵌状态下的海啸起动波高, 最大值为 DDHW\_01 的 3.95 m, 最小值起动波高为 1.80 m(XDH\_04), 其余珊瑚巨砾计算结果均超过 2 m。而 Liu 等<sup>[42]</sup>基于数值模拟方法对南海地区海啸发生预测结果表明, 百年一遇海啸波高超 2 m, 袭击三亚概率为 0%, 而波高介于 1~2 m 的概率为 3.44%, 这些海啸波高的模拟结果均显著低于本文的计算结果。此外, 海南岛是我国受台风影响最为频繁的区域<sup>[30]</sup>, 有关台风的历史记录可以追溯到约 1 000 年前<sup>[43]</sup>, 而关于海啸的记录却鲜有记

载。因此可以确证大、小东海的珊瑚巨砾是海啸成因的可能性很低。

流速同样也是刻画水动力强度的重要指标。根据 TLS 技术计算结果, 在镶嵌状态下, 大、小东海巨砾的最小起动流速为 10.54 m/s(DDHW\_03 号), 最大的起动流速为 14.47 m/s(XDH\_01 号)。西太平洋地区的海岸巨砾起动流速已有研究结果显示, 泰国曼谷湾的海岸巨砾镶嵌状态下的起动流速为 2.8~7.4 m/s<sup>[20]</sup>, 菲律宾萨马岛的海岸巨砾镶嵌状态下的起动流速为 12.8~43.1 m/s<sup>[18]</sup>, 菲律宾卡利科安岛的海岸巨砾镶嵌状态下的起动流速为 19.5~23.1 m/s<sup>[14]</sup>。从比较结果来看, 海南岛大、小东海的海岸珊瑚巨砾的起动流速介于西太平洋地区最大起动流速与最小起动流速之间, 进一步表明大、小东海的珊瑚巨砾可能是风暴成因。

理论上, 海岸巨砾在某个区域堆积的最大质量和最远搬运距离都与其受极端波浪事件的强度能量呈正相关关系。在极端波浪事件作用下, 海岸巨砾受水动力能量越高, 搬运距离越远, 所能搬运的海岸巨砾的质量也越大<sup>[37]</sup>。本文海南岛大、小东海的巨砾搬运距离分布在 30~120 m 范围内, 其中最短距离为 31.8 m(XDH\_06 号), 最长距离为 116.03 m(XDH\_17 号), 而最大的海岸巨砾搬运距离为 64.58 m(XDH\_01 号)。Goto 等<sup>[44]</sup>认为 300 m 可以作为西太平洋地区风暴条件下珊瑚巨砾被搬运的极限距离, 超过这个距离可以认为是海啸成因的巨砾。根据西太平洋地区的日本冲绳海岸、菲律宾卡利科安岛、帕劳群岛等地基于珊瑚巨砾沉积的现代超强台风的现场调查研究显示(图 6)<sup>[10, 14, 45]</sup>, 在帕劳群岛, 最大珊瑚巨砾的搬运距离为 91.7 m; 在菲律宾卡利科安岛, 最大的珊瑚巨砾的搬运距离为 168 m; 在日本冲绳海岸, 最大的珊瑚巨

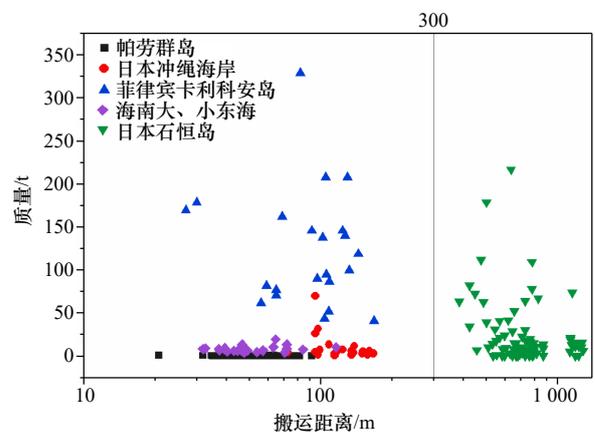


图 6 海岸巨砾质量与搬运距离关系<sup>[10, 14, 44-45]</sup>

Fig. 6 Transport distance vs mass of coastal boulders<sup>[10, 14, 44-45]</sup>

砾搬运距离为 167 m。这些现代超强台风的调查结果均符合 300 m 的极限搬运距离理论。因此,根据本文研究的大、小东海珊瑚巨砾的搬运距离也可以认定,海南大、小东海巨砾更可能是受到了风暴作用而非海啸作用搬运形成。

此外,对比图 6 中 3 处现代台风调查地点(台风“宝霞”(最高时速 60 m/s)过境后的帕劳群岛,台风“南施”(最高时速 100 m/s)过境后的冲绳海岸和台风“海燕”(最高时速 78 m/s)过境后的菲律宾卡利科安岛)的结果可以看到,3 处地点巨砾的分布情况(被搬运的巨砾最大重量和输运距离)与台风强度对应较好。西太平洋地区的台风源区域相同,海南大、小东海分布的巨砾重量和搬运距离十分接近,且本文选择的帕劳群岛、冲绳和菲律宾 3 个地点的地貌条件和大、小东海的地貌特征类似,所调查的对象均为岸礁珊瑚礁平台上的珊瑚巨砾,因此可以断定,假设海南大、小东海巨砾由台风引起的情况下,影响海南岛大、小东海地点的最大台风强度可能与帕劳群岛的超强台风“宝霞”相当,也属于超强台风。

从巨砾的分布规律来看,大东海与小东海西侧的珊瑚礁平台上珊瑚巨砾的分布规模、最大体积和数量均大于东侧,且主轴方向以东南向为主。而分析三亚湾多年(1976–1991 年)各向最大波高数据可以看到(图 7),多年最大波高为 9 m,方向为 ESE 方向,其方向与大东海和小东海西侧珊瑚礁平台巨砾分布特征显著一致,这更加表明大、小东海的珊瑚巨砾是台风作用产生而非海啸作用产生。

综合以上分析结果,海南岛南部大、小东海的海岸珊瑚巨砾沉积是由台风作用造成,同时产生这些巨砾的最大台风强度可能与台风“宝霞”(最高时速 60 m/s)的强度相当。但是由于不同地点台风活动规律和具体地貌特征的差异,同样强度的台风所产生的流速在不同地点会存在一定差异。在后期的研究中还需要加强海南岛珊瑚岸礁风暴巨砾形成的台风数值模拟工作,以便于揭示目前海南岛南部海域水体流速与台风强度对应关系,以及珊瑚巨砾临界起动波高对应的流速大小,以便进一步验证本文的研究结论。

## 6 结论

本文基于地面 3D 激光扫描技术,对海南大、小东海的海岸珊瑚巨砾沉积进行了研究与分析,主要结论如下:

(1)海南大、小东海的珊瑚巨砾以镶嵌跃移起动为主,在强水动力条件下从珊瑚礁平台前缘或前缘下

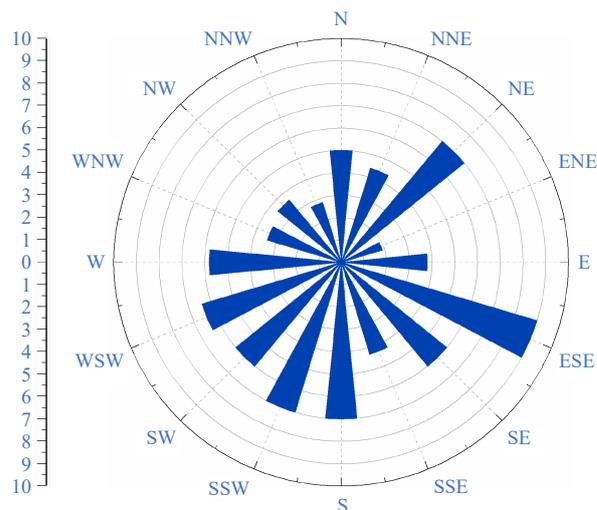


图 7 三亚湾累年各向最大波高分布  
(莺歌海海洋站)

Fig. 7 Annual maximum wave height distribution in Sanya Bay (data from Yinggehai Marine Station)

部破碎分离被搬运至礁平台后部。在分布上,小东海西岸巨砾规模最大、数量最高,大东海西岸次之,大东海东岸最小。基于 TLS 技术测量结果的水文模型分析显示,在东岸,大东海珊瑚巨砾的起动波高和起动流速均相对较小,起动波高为 10.22 m,起动流速为 10.78 m/s;在西岸,大东海与小东海珊瑚巨砾的起动波浪波高与起动流速均较为接近,其中大东海西岸起动波高在 8.59~15.82 m,平均波高为 12.10 m,起动流速在 10.54~13.06 m/s,平均流速为 12.03 m/s,而小东海西岸起动波高在 7.18~15.29 m,平均波高为 11.43 m,起动流速在 10.78~14.47 m/s,平均流速为 11.91 m/s。

(2)TLS 技术对比传统巨砾体积参数的测量方法,具有精度高、速度快、获取数据简便的优势,其显著提高了巨砾起动水动力条件的计算准确度,以及巨砾体积和质量的计算精度。

(3)海南岛大、小东海珊瑚巨砾应为台风事件作用形成,且影响该地的最大台风强度应该达到了超强台风级别。由于缺乏精确年代数据,有关本文研究区域台风发生的频率和强度关系问题还需要进一步研究与论证。此外后续需要加强海南岛海域台风数值模拟研究,获得更为精确的巨砾起动流速和波浪数据,验证本文的研究结论。

致谢:华东师范大学河口海岸学国家重点实验室钱伟伟工程师、南京大学地理与海洋科学学院王丹丹、许眸紫、杨保明、樊一阳、祁雅莉参加了野外调查工作,谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] 李佳英, 薛建军, 王维国, 等. 2013年国外重大台风灾害分析与启示[J]. 气象与减灾研究, 2014, 37(2): 50–54.  
Li Jiaying, Xue Jianjun, Wang Weiguo, et al. Analysis and enlightenment of the overseas important typhoon disaster in 2013[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2014, 37(2): 50–54.
- [2] Serreze M C, Walsh J E, Chapin III F S, et al. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment[J]. *Climatic Change*, 2000, 46(1/2): 159–207.
- [3] McGranahan G, Balk D, Anderson B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones[J]. *Environment and Urbanization*, 2007, 19(1): 17–37.
- [4] 廖淦标, 范代读. 全球变暖是否导致台风增强: 古风暴学研究进展与启示[J]. 科学通报, 2008, 53(19): 2907–2922.  
Liu K B, Fan Daidu. Perspectives on the linkage between typhoon activity and global warming from recent research advances in paleotempestology[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(19): 2907–2922.
- [5] Frohlich C, Hornbach M J, Taylor F W, et al. Huge erratic boulders in Tonga deposited by a prehistoric tsunami[J]. *Geology*, 2009, 37(2): 131–134.
- [6] Terry J P, Lau A Y A, Etienne S. Outlook for boulder studies within tropical geomorphology and coastal hazard research[M]//Terry J P, Lau A Y A, Etienne S. Reef-Platform Coral Boulders. Singapore: Springer, 2013: 97–102.
- [7] Morton R A, Gelfenbaum G, Jaffe B E. Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples[J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 200(3/4): 184–207.
- [8] Hall A M, Hansom J D, Williams D M, et al. Distribution, geomorphology and lithofacies of cliff-top storm deposits: examples from the high-energy coasts of Scotland and Ireland[J]. *Marine Geology*, 2006, 232(3/4): 131–155.
- [9] Spiske M, Böröcz Z, Bahlburg H. The role of porosity in discriminating between tsunami and hurricane emplacement of boulders—a case study from the Lesser Antilles, southern Caribbean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 268(3/4): 384–396.
- [10] Goto K, Okada K, Imamura F. Characteristics and hydrodynamics of boulders transported by storm waves at Kudaka Island, Japan[J]. *Marine Geology*, 2009, 262(1/4): 14–24.
- [11] Etienne S, Paris R. Boulder accumulations related to storms on the south coast of the Reykjanes Peninsula (Iceland)[J]. *Geomorphology*, 2010, 114(1/2): 55–70.
- [12] Terry J P, Dunne K, Jankaew K. Prehistorical frequency of high-energy marine inundation events driven by typhoons in the Bay of Bangkok (Thailand), interpreted from coastal carbonate boulders[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(4): 553–562.
- [13] Nandasena N A K, Paris R, Tanaka N. Reassessment of hydrodynamic equations: minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis)[J]. *Marine Geology*, 2011, 281(1/4): 70–84.
- [14] Kennedy A B, Mori N, Yasuda T, et al. Extreme block and boulder transport along a cliffed coastline (Calicoan Island, Philippines) during Super Typhoon Haiyan[J]. *Marine Geology*, 2017, 383: 65–77.
- [15] Bryant E A, Young R W, Price D M. Evidence of tsunami sedimentation on the southeastern coast of Australia[J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(6): 753–765.
- [16] Bryant E A, Young R W, Price D M, et al. The impact of tsunami on the coastline of Jervis Bay, southeastern Australia[J]. *Physical Geography*, 1997, 18(5): 440–459.
- [17] Nott J. Extremely high-energy wave deposits inside the Great Barrier Reef, Australia: determining the cause—tsunami or tropical cyclone[J]. *Marine Geology*, 1997, 141(1/4): 193–207.
- [18] May S M, Engel M, Brill D, et al. Block and boulder transport in eastern Samar (Philippines) during Super typhoon Haiyan[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2015, 3(4): 543–558.
- [19] Erdmann W, Kelletat D, Scheffers A. Boulder transport by storms—extreme-waves in the coastal zone of the Irish west coast[J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 1–13.
- [20] Terry J P, Jankaew K, Dunne K. Coastal vulnerability to typhoon inundation in the Bay of Bangkok, Thailand? Evidence from carbonate boulder deposits on Ko Lam Island[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 165: 261–269.
- [21] Maouche S, Morhange C, Meghraoui M. Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean[J]. *Marine Geology*, 2009, 262(1/4): 96–104.
- [22] Switzer A D, Burston J M. Competing mechanisms for boulder deposition on the southeast Australian coast[J]. *Geomorphology*, 2010, 114(1/2): 42–54.
- [23] 马立广. 地面三维激光扫描测量技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.  
Ma Liguang. The research of terrestrial laser scanning technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [24] Rosser N J, Petley D N, Lim M, et al. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2005, 38(4): 363–375.
- [25] 谢卫明, 何青, 章可奇, 等. 三维激光扫描系统在潮滩地貌研究中的应用[J]. 泥沙研究, 2015(1): 1–6.  
Xie Weiming, He Qing, Zhang Keqi, et al. Application of the terrestrial laser scanner to measuring geomorphology in tidal flats and salt marshes[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015(1): 1–6.

- [26] 王春晓, 纪育强, 孙强, 等. 三维激光扫描技术在海洋模型试验中的应用[J]. *海岸工程*, 2013, 32(2): 55–62.  
Wang Chunxiao, Ji Yuqiang, Sun Qiang, et al. Application of 3D laser scanning technology to the marine model test[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 32(2): 55–62.
- [27] Olsen M J, Cheung K F, Yamazaki Y, et al. Damage assessment of the 2010 Chile earthquake and tsunami using terrestrial laser scanning[J]. *Earthquake Spectra*, 2012, 28(S1): S179–S197.
- [28] Donoghue D N M, Watt P J, Cox N J, et al. Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(4): 509–522.
- [29] Calders K, Newnham G, Burt A, et al. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2015, 6(2): 198–208.
- [30] 梁海萍, 梁海燕, 车志伟, 等. 近五十年登陆海南省的热带气旋统计特征分析[J]. *海洋预报*, 2015, 32(4): 68–74.  
Liang Haiping, Liang Haiyan, Che Zhiwei, et al. A statistical analysis of landfall tropical cyclone in fifty years in Hainan Province[J]. *Marine Forecasts*, 2015, 32(4): 68–74.
- [31] 张明书, 刘键, 李浩, 等. 海南岛周缘珊瑚礁的基本特征和成礁时代[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(2): 25–43.  
Zhang Mingshu, Liu Jian, Li Hao, et al. Basic characteristics and formation time of peripheral coral reefs in Hainan Island[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1990, 10(2): 25–43.
- [32] 吕炳全, 王国忠, 全松青. 海南岛珊瑚岸礁的特征[J]. *地理研究*, 1984, 3(3): 1–16.  
Lü Bingquan, Wang Guozhong, Quan Songqing. The characteristics of fringing reefs of Hainan Island[J]. *Geographical Research*, 1984, 3(3): 1–16.
- [33] 王颖. 海南岛海岸环境特征[J]. *海洋地质前沿*, 2002, 18(3): 1–9.  
Wang Ying. Features of Hainan Island coastal environment[J]. *Marine Geology Letters*, 2002, 18(3): 1–9.
- [34] 毛龙江, 张永战, 魏灵, 等. 海南岛三亚湾海滩研究[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 477–484.  
Mao Longjiang, Zhang Yongzhan, Wei Ling, et al. Study on beach characteristics in Sanya area of Hainan Island[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 477–484.
- [35] Nott J. Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(1/2): 269–276.
- [36] Lorang M S. A wave-competence approach to distinguish between boulder and megaclast deposits due to storm waves versus tsunamis[J]. *Marine Geology*, 2011, 283(1/4): 90–97.
- [37] Scheffers A, Kelletat D. Sedimentologic and geomorphologic tsunami imprints worldwide: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1/2): 83–92.
- [38] Engel M, May S M. Bonaire's boulder fields revisited: evidence for Holocene tsunami impact on the Leeward Antilles[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 54: 126–141.
- [39] Hoffmeister D, Ntageretzis K, Aasen H, et al. 3D model-based estimations of volume and mass of high-energy dislocated boulders in coastal areas of Greece by terrestrial laser scanning[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2014, 58(3): 115–135.
- [40] 尹洪强. 基于SWAN模式下南海台风浪的推算[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.  
Yin Hongqiang. Typhoon wave forecast in the South Sea by SWAN model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [41] 周良明, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用WAVEWATCH-III模式对南海的波浪场进行数值计算、统计分析和研究[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(5): 1–8.  
Zhou Liangming, Wu Lunyu, Guo Peifang, et al. Simulation and study of wave in South China Sea using WAVEWATCH-III[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(5): 1–8.
- [42] Liu Y, Santos A, Wang S M, et al. Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, 163(1/4): 233–244.
- [43] 周亮, 高抒, 杨阳, 等. 海南岛东南部海湾350年古风暴事件沉积与历史文献记录对比[J]. *海洋学报*, 2015, 37(9): 84–94.  
Zhou Liang, Gao Shu, Yang Yang, et al. Comparison of paleostorm events between sedimentary and historical archives: a 350 year record from southeastern Hainan Island coastal embayments[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(9): 84–94.
- [44] Goto K, Miyagi K, Kawana T, et al. Emplacement and movement of boulders by known storm waves-field evidence from the Okinawa Islands, Japan[J]. *Marine Geology*, 2011, 283(1/4): 66–78.
- [45] Hongo C, Kurihara H, Golbuu Y. Coral boulders on Melekeok reef in the Palau Islands: an indicator of wave activity associated with tropical cyclones[J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 14–22.

## Application of the terrestrial laser scanner to the coastal boulders on the southern coast of Hainan Island

Liu Zhenqiao<sup>1</sup>, Zhou Liang<sup>1</sup>, Gao Shu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Coastal boulders, with durable and easily visible, have been widely used as markers to confirm the existence and estimate the magnitude of marine hydrodynamic extreme events, which is valuable for risk prediction and coastal management. A detailed survey of large boulder accumulations was carried out at Dadonghai and Xiaodonghai sites on the southern coast of Hainan Island. The size, position and distance from the shoreline of 24 boulders were measured by Riegl VZ4000 3D terrestrial laser (TLS) scanner and traditional methods, respectively, in order to determine their volume parameters, mass as well as the conditions under which they were transported landward to their present positions. The results were then analyzed with hydrodynamic models to evaluate the characteristics of the transporting waves and flow speeds. Storm waves would be responsible for the detachment and transportation of these largest boulders. The maximum intensity of typhoon hitting this area should not be less than that of super Typhoon Baoxia. The results indicate that the TLS technology has the advantages of convenience, speed and accuracy to measure hydrodynamic process of coastal boulders than that of traditional methods. The study insists on the potential for reconstructing the history of paleostorm activity in the South China Sea and predicting the occurrence trend of marine extreme wave disasters in the coastal areas of Hainan Island in the future.

**Key words:** coral boulders; marine extreme hydrological events; Terrestrial Laser Scanner; coral reef bay; Hainan Island