

香港世界地质公园粮船湾组碎斑熔岩柱状节理构造特征*

王存智,朱清波,杨祝良,沈加林,姜 杨,靳国栋,周效华,时 磊

(中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016)

摘要:在香港世界地质公园西贡火山岩园区,白垩纪粮船湾组流纹质碎斑熔岩普遍发育完整的柱状节理,构成世界上面积最大的流纹质火山岩石柱群。文章在详细野外观察与测量的基础上,分析了粮船湾组石柱群原生柱状节理构造特征,初步探讨了其成因。结果表明,该区火山岩石柱截面形态以六边形为主,少量五边形及不规则状,直径以 1~3m 为主;完整的单个石柱高一般 20~30m;石柱整体向 NW 和 SW 陡倾。但是,粮船湾组火山岩非全部发育柱状节理,按石柱发育程度可分为极发育、一般发育(被破坏)和不发育三种类型。通过统计大量原生柱面的产状,发现各个方向的柱面均有发育,其无序性符合冷凝收缩的成因模式,认为后期次生节理构造及海蚀作用对原生柱状节理有一定程度的破坏。

关键词:柱状节理;流纹质碎斑熔岩;粮船湾组;西贡;世界地质公园

中图分类号:P542⁺.36

文献标识码:A

柱状节理指发育于火山岩中的一种呈规则的或不规则的四方、五方、六方棱柱体形态的原生张性破裂构造,常构成壮观的石柱群^[1]。世界上绝大多数火山岩石柱均发育在产状平缓的玄武岩中^[2-4],因此一般也认为柱状节理只能发育在 SiO₂ 含量较低(45%~52%)、粘度小、流动性大的基性喷出岩中^[5-6]。近年来的野外地质调查表明,在响岩、流纹英安斑岩和流纹斑岩^[1,7-8]、英安斑岩^[9]、霏细斑岩(浙江镇海古双岩)和流纹质碎斑熔岩(浙江临海大堪头破火山)^[10]、安山岩^[11]、甚至熔结凝灰岩^[12]等中酸性岩石中均可发育柱状节理,其连续的石柱面积一般不超过 30 km²^[13]。

香港西贡地区发育了世界上面积最大的粮船湾组流纹质碎斑熔岩石柱群,估算碎斑熔岩岩穹原始面积可达 150 km²^[14],其独特的地貌形态构成香港世界地质公园的核心地质景观,六边形石柱也因此成为该地质公园的图案标志。前人对该石柱区原生柱状节理已有报道^[13,15],但关于柱状节理的构造特征尚缺少系统研究。笔者近期对粮船湾组柱状节理

进行详细研究,系统测量了原生柱面产状、石柱截面形态及大小、石柱柱体高度和倾斜方向及次生节理^[16]等,结合前人资料,探讨柱状节理的成因。

1 区域地质概况

香港位于中国东南大陆巨型中生代陆相火山岩带内,岩浆活动十分剧烈,晚中生代陆相火山岩约占陆地基岩面积的 50%^[15]。位于香港东部的西贡地区是香港晚中生代火山岩主要分布区之一,出露的火山岩地层包括粮船湾组(Krh)、槟榔湾组(Krp)、孟公屋组(Krm)、鹧鸪山组(Krc)和摩星岭组(Krd)。

粮船湾组火山岩是香港地区中生代最晚期火山喷发的产物,其锆石 U-Pb 年龄为 140Ma^[17],属西贡破火山机构的中央侵出相流纹质碎斑熔岩岩穹^[14],以钾长石和石英斑晶发育碎斑结构和珠边结构、基质发育霏细结构与流动构造为特征,其边缘局部过渡为流纹质熔岩流^[14]。西贡破火山属于被长

* 收稿日期:2015-01-12 改回日期:2015-03-30 责任编辑:谭桂丽

基金项目:西贡地区火山岩石柱群和基性岩墙研究(项目编号:AFCD/SQ/223/2/C)、亚洲滨太平洋中新代火山岩带地质特征及其与太平洋东岸火山岩带对比研究(项目编号:1212011120134)资助。

第一作者简介:王存智,1983 年生,男,助理研究员,研究方向为构造地质学。

期剥蚀(海蚀)作用严重破坏的破火山机构^[18],推测其中心大致在沙塘口山—火石洲一带,破火山的东半部已基本隐没于海平面之下,目前所见的火山岩石柱仅为碎斑熔岩岩穹的残留部分^[19]。

粮船湾组碎斑熔岩构成的中央侵出相岩穹现今集中保留于西贡郊野公园东南部万宜水库周围,同时还零星残留于粮船湾海诸小岛(包括濠西洲、大头洲、吊钟洲、匙洲、伙头坟洲、沙塘口山、火石洲、牛尾洲东部)、清水湾半岛东南部及其以东的若干岛屿(平面洲、大癞痢、青洲、果洲群岛)(图 1),普遍以发

育柱状节理和形成石柱群为其地貌特色,构成了香港世界地质公园西贡火山岩园区独特的地质景观。

粮船湾组石柱群不同程度受断裂、节理等后期构造的改造。香港全区位于 NE 向莲花山断裂带内,表现为区内断裂构造发育,包括 NE、NNE、NW、NNW 等几组断裂,主干断裂常近于垂直或陡倾($>70^\circ$),其中 NE 向断裂最为发育,主要为走滑断裂^[20],明显控制了中生代岩浆活动及现代地貌^[21]。NE 和 NW 向断裂及其伴生的节理是影响西贡火山岩石柱群形貌特征的主体构造^[22]。

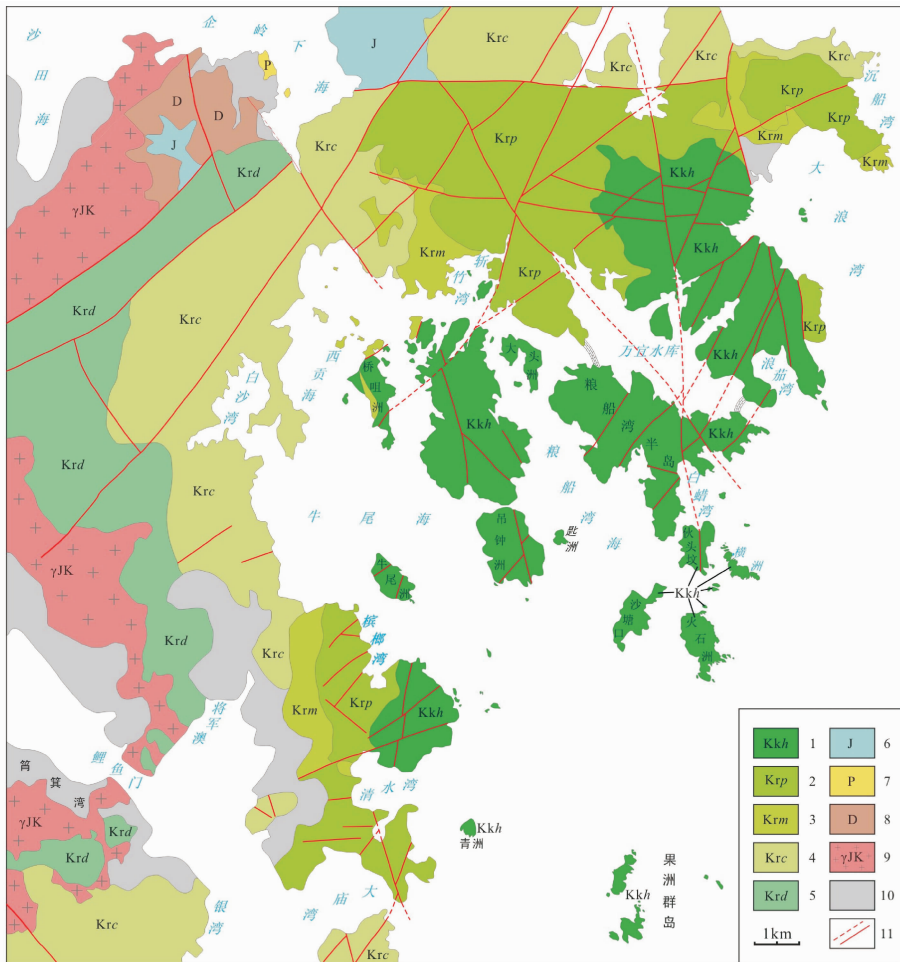


图 1 香港西贡地区地质简图(据文献[14]修改)

Fig. 1 Generalized geological map of Sai Kung area in Hong Kong

1-粮船湾组流纹质碎斑熔岩;2-槟榔湾组英安质-流纹质熔结凝灰岩;3-孟公屋组砂岩-泥岩、凝灰岩;4-鹧鸪山组流纹质熔结凝灰岩;5-摩星岭组流纹质晶屑(熔结)凝灰岩、沉凝灰岩等;6-侏罗系:含火山砾的晶屑凝灰岩;7-二叠系:钙质砂岩、粉砂岩、泥岩与砾岩和灰岩互层;8-泥盆系:石英砂岩、粉砂岩夹砾岩;9-花岗岩;10-冲洪积及人工开垦区;11-断层及推断层

2 原生柱状节理构造特征

2.1 大浪湾—浪茄湾一带

大浪湾—浪茄湾一带是粮船湾组火山岩石柱群的集中分布区之一。作者对该区浪茄湾南侧的万宜水库东坝、大浪湾西海岸、罾棚角及饭甑洲等地的石

柱群进行了实地测量。

万宜水库东坝火山岩石柱露头新鲜,大坝两端及周围地区柱状节理十分发育,石柱形态保存完好,是观察粮船湾组石柱群的绝佳场所。石柱以规则的六方柱为主,局部为五方柱。常见相邻的三个柱体三边交汇构成清晰的三联点,三者呈标准的 120° 夹

角。此处柱体高达20~50m,直径以1m左右为主,次生节理不太发育,局部见横节理。东坝西侧最引人注目的是弯曲的火山岩石柱(No. 65),石柱群总体向北西倾伏,倾伏方向与横节理的倾向一致;石柱体内部发育挠曲构造,挠曲的轴面产状($105^{\circ}\angle 42^{\circ}$)也与柱体的横节理产状一致,沿挠曲的最大弯曲位置有基性岩脉($120^{\circ}\angle 45^{\circ}$)侵入并向上呈尖灭状(图2)。对于本处弯曲石柱的形成,认为是石柱在尚未完全固结的半塑性状态下流变剪切作用而成^[19],属于成岩过程中的同生构造。

大浪湾西海岸大部分地区次生节理较为发育,以纵节理为主。火山岩石柱发育较差,呈支离破碎状,仅在碱田湾一带(No. 17)发育尚可。柱体截面总体以不规则的五边形为主,直径为1.3~1.9m。

石柱高度以10~20m为主,局部可达50~60m,均向南西倾伏。

罾棚角—饭甑洲位于大浪湾南部与浪茄湾之间,火山岩石柱发育较完整(图2)。在饭甑洲灯塔附近,可见石柱极为发育,从海面一直延伸至山顶,高为5~40m。次生纵节理不太发育,一般仅发育在石柱内部,延伸不远,对原生柱面并无改造。石柱截面形态保存完好,总体以六边形为主,柱边平直,三联点清晰可见。柱体直径一般1~2m,总体较为直立,略向南西倾伏(石柱棱产状 $250^{\circ}\angle 80^{\circ}$)。

2.2 粮船湾半岛

粮船湾半岛是粮船湾组的命名地,是香港世界地质公园内火山岩石柱发育最典型的地区,但其东、西两侧海岸火山岩石柱的发育略有差异。

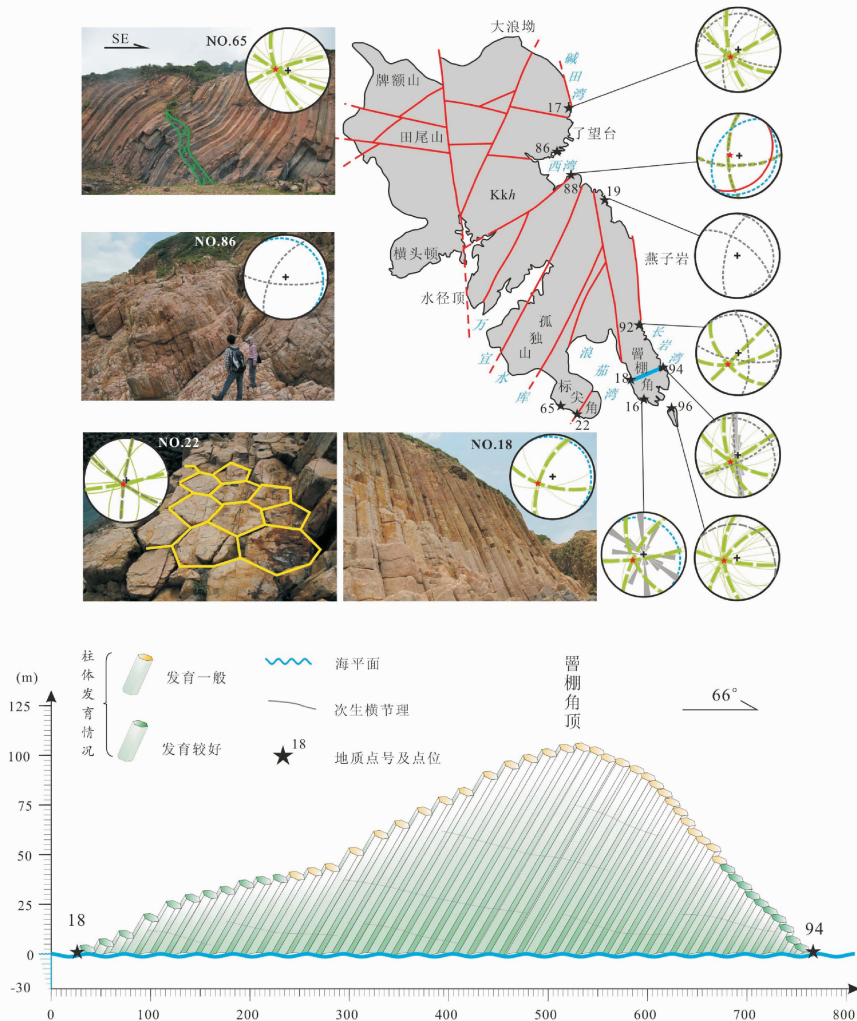


图2 大浪湾—浪茄湾一带粮船湾组火山岩石柱构造特征及剖面

Fig. 2 Structural characteristics and cross-section of volcanic columns in High Island Formation, Tai Long Wan and Long Ke Wan areas

极射赤平投影采用下半球投影;绿色虚线代表火山岩石柱原生柱面的产状(细线为实测产状,粗线为优势产状);蓝色虚线代表流面的产状;灰色虚线代表次生节理的产状;灰色阴影为次生节理的走向玫瑰花图;红色实线为断层产状;★代表石柱体(棱)的产状;★22代表调查点位置及编号;蓝色粗实线示石柱剖面位置1

粮船湾半岛东海岸石柱总体发育完整(图 3), 尤其白腊仔一带(No. 24)发育极好。石柱截面以六边形为主, 直径均为 1~2m, 柱体高 20m 左右, 均近直立产出, 稍向南西倾伏(石柱棱产状 $251^{\circ} \angle 84^{\circ}$)。次生纵节理不太发育, 一般仅发育在石柱内部, 陡倾、透入性不强, 不切穿柱体。对石柱群破坏较明显的为横节理, 均向北东方向缓倾(倾角约 20°), 石柱群沿横节理发生滑动形成向北东缓倾的正滑断层, 多形成横切石柱的平台。

在粮船湾半岛西海岸, 火山岩石柱群次生节理较发育, 对石柱破坏明显, 原始形态保存较差(图 3), 与粮船湾半岛东海岸形成鲜明对比。总体看, 火

山岩石柱以六边形和五边形为主, 直径约 2m, 少量大者可达 4m(No. 44), 柱体总体向南西陡倾(石柱棱产状 $245^{\circ} \angle 67^{\circ}$)。局部地区如深笃和大岩顶(No. 71)一带, 火山岩石柱群被次生纵节理改造, 很难识别原生的柱状节理及其三联点。许多露头看似石柱的柱体, 实则均为次生纵节理相互交切形成的次生节理柱, 使得原生柱状节理的截面形态及大小难以鉴别。横节理也普遍发育, 总体向北东方向缓倾(倾角 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$), 空间上倾向和倾角略有变化, 总体与石柱的柱体(棱)产状垂直, 将石柱体切割成长短不一的石柱, 在海浪冲蚀下石柱极易垮塌, 沿横节理面多形成台阶状的平台。

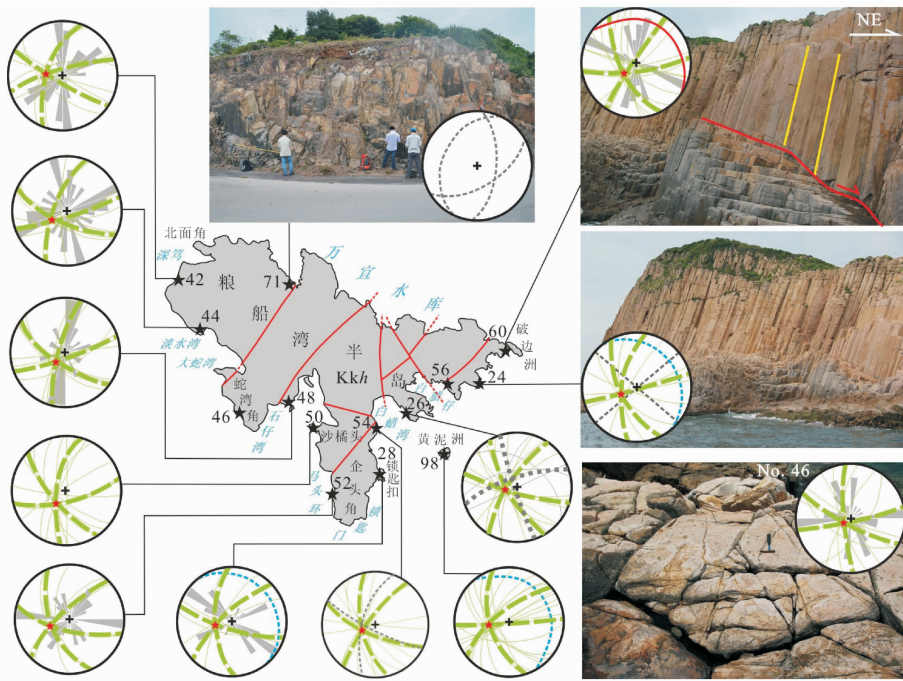


图 3 粮船湾半岛火山岩石柱构造特征(图例说明同图 2)

Fig. 3 Structural characteristics of volcanic columns in High Island

2.3 伙头坟洲—横洲

伙头坟洲位于粮船湾半岛企头角顶东侧, 石柱总体向南西方向倾伏, 次生纵节理密集发育, 倾向以北西向和北东向为主, 多构成一组共轭剪节理, 将石柱强烈切割成棋盘状、碎块状和短柱状, 远处观看似原生石柱, 实则普遍为次生节理柱。近处观察已难辨完整的石柱, 仅能识别部分石柱的原生柱面及其三联点。

横洲位于伙头坟洲东南侧, 石柱较为发育, 特别是西部石柱极为发育, 柱体形态保存完好, 以规则的六方柱为主, 局部为五方柱, 三联点清晰可见, 柱体高达 10~30 m, 直径以 1 m 左右为主, 整体向南西倾伏(石柱棱产状 $240^{\circ} \angle 70^{\circ}$)。这一带火山岩石柱横节理普遍发育($60^{\circ} \angle 20^{\circ}$), 在浪击线附近逐渐演变成海蚀凹槽, 导致石柱崩塌形成陡崖等海蚀地貌。

在横洲南部则出现海蚀洞、海蚀拱等海蚀地貌(图 4)。类似的石柱海蚀地貌在大浪湾、浪茄湾、粮船湾半岛及横洲、果洲等岛屿同样明显。

2.4 沙塘口山—火石洲

沙塘口山位于伙头坟洲西南, 火山岩石柱被次生节理明显破坏, 且发育沿次生节理方向侵入的基性岩脉(图 5 左上)。但较之于伙头坟洲, 沙塘口山的石柱相对完整, 可识别部分石柱的原生柱面和三联点, 形态以六边形和五边形石柱最为发育; 柱体较粗大, 直径一般约 2m, 少数达 3m, 一般高 5~10m, 整体向南西陡倾(石柱棱产状 $250^{\circ} \sim 260^{\circ} \angle 70^{\circ} \sim 75^{\circ}$)(图 5)。

火石洲位于沙塘口山东南, 火山岩石柱群特征较为明显, 以粗大的六方柱为主, 直径约 2.5~3m,

总体向南西方向陡倾(石柱棱产状 $265^{\circ}\sim 280^{\circ}\angle 70^{\circ}\sim 75^{\circ}$)。后期次生纵节理较为发育,使得柱体截面较为破碎,形态不规则;横节理也较为发育,总体向北东—南东缓倾($85^{\circ}\sim 100^{\circ}\angle 15^{\circ}\sim 20^{\circ}$),与石柱柱

体近垂直。在火石洲东侧崖壁可见石柱群沿多个滑动面向东倒塌,依横节理或断层面形成两级石柱阶梯,第一级高度从海平面至约 5m 高处,第二级出现于约 20~30m 高度处(图 5)。

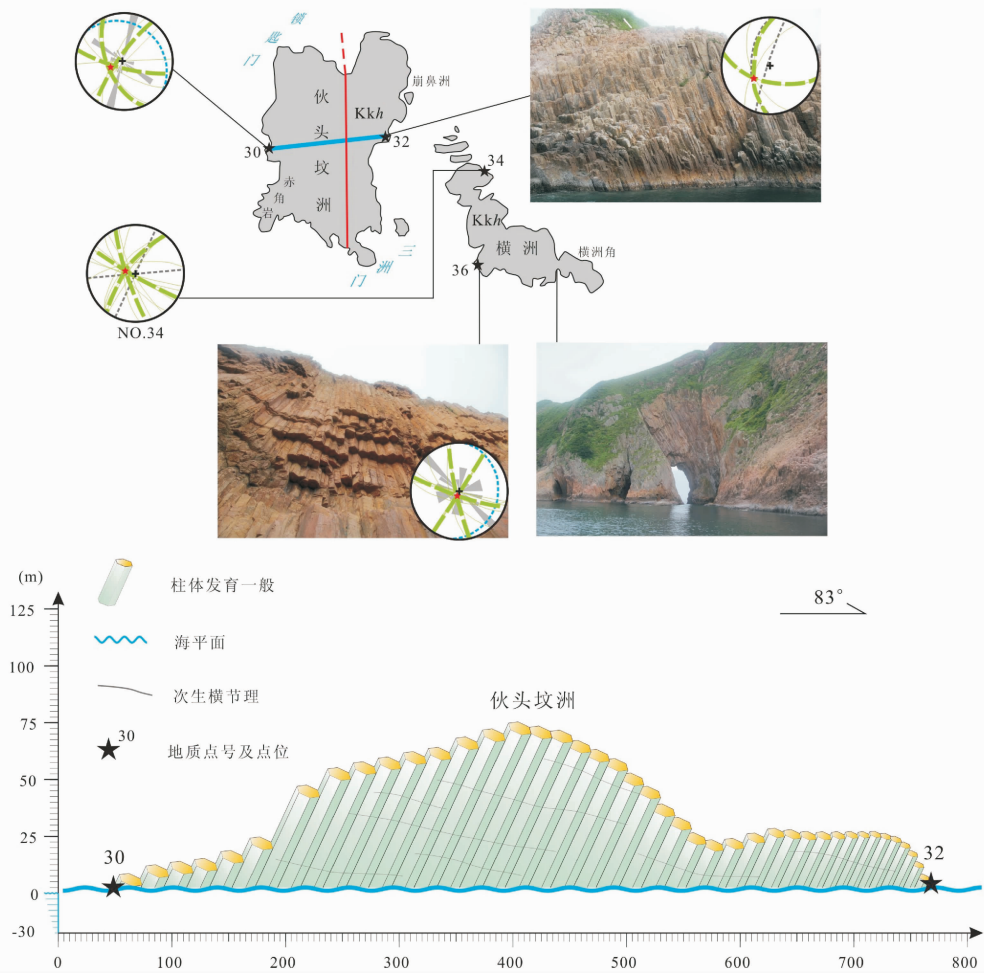


图 4 伙头坟洲—横洲粮船湾组火山岩石柱构造特征(图例说明同图 2)及石柱剖面

Fig. 4 Structural characteristics and cross-section of volcanic columns in High Island Formation, Town Island and Wang Chau areas

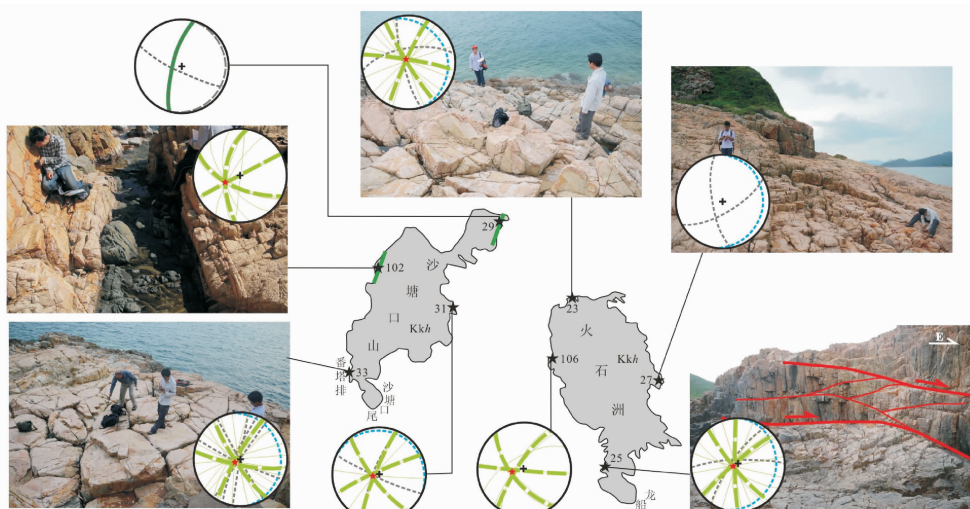


图 5 沙塘口山—火石洲火山岩石柱构造特征与基性岩脉(图例说明同图 2)

Fig. 5 Structural characteristics of volcanic columns and mafic dikes in Bluff Island and Basalt Island

2.5 濠西洲

濠西洲位于粮船湾半岛以西,柱状节理极为发育,但普遍被次生节理破坏而呈破碎状,尤其北部破坏强烈,已不见保存完整的石柱(图 6)。

远观濠西洲南岸,可见石柱群景观,近距离观察,因后期次生节理发育而多数被破坏,但仍能识别石柱原始形态,部分三联点较为清晰。柱体以六方柱和五方柱为主,直径一般约 3 m,大者可达 4 m;柱边平直,向北西陡倾(石柱棱倾伏向 320°),倾角一般为 75°~80°。横节理在濠西洲普遍存在,整体向东缓倾(倾角 5°~10°),一般与石柱柱体(棱)近垂直产出,是石柱倾倒的重要因素。

2.6 吊钟洲

吊钟洲位于濠西洲南侧,石柱总体完整性较差,柱体最高可达 10m,以不规则的五方柱为主,少量六方柱,直径一般 2~3m。西南部柱状节理发育较好,东部因后期次生节理发育多数已被破坏,但部分仍可见若干清晰的三联点。次生节理以横节理为主,产状总体向北东—南东缓倾(70°~100°∠5°~15°),与石柱体近垂直,导致石柱沿节理面倒塌入海,在近岸形成台阶状平台。此外,纵节理也较发育,虽已切穿柱体,但尚未使其分离破碎,对石柱的整体性影响不大(图 7)。

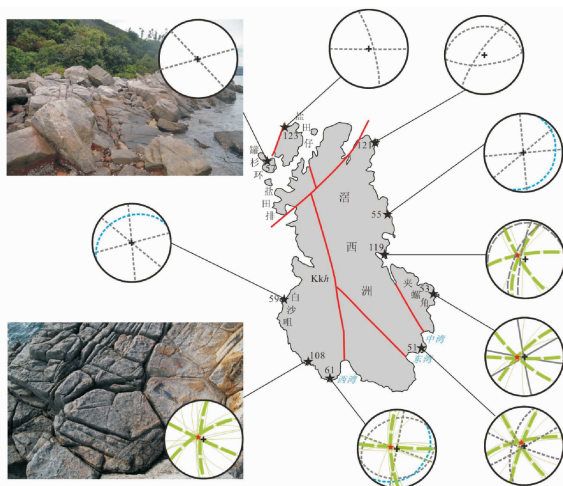


图 6 濠西洲火山岩石柱构造特征(图例说明同图 2)

Fig. 6 Structural characteristics of volcanic columns in Kau Sai Chau

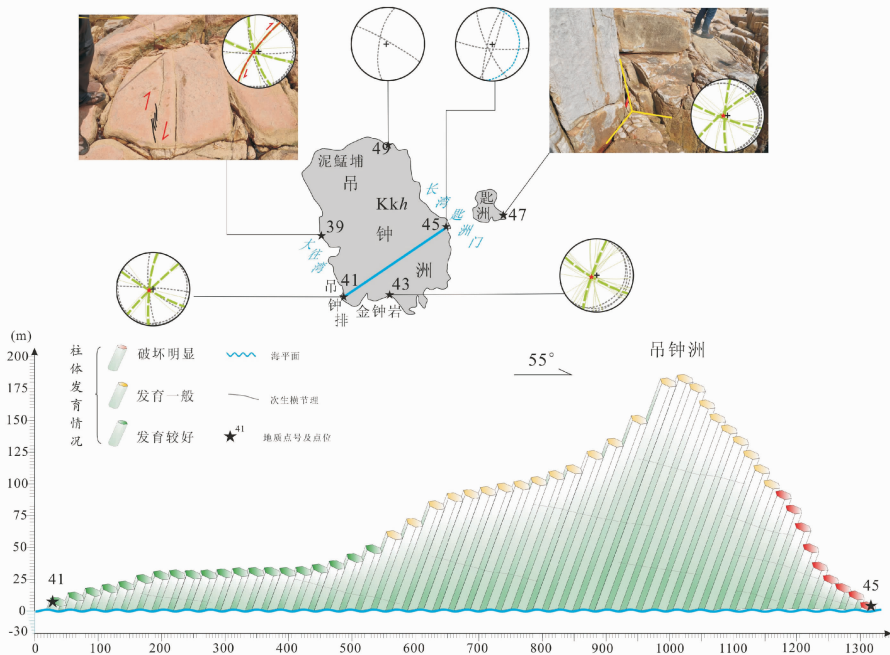


图 7 吊钟洲石柱群构造特征(图例说明同图 2)及石柱剖面

Fig. 7 Structural characteristics and cross-section of volcanic columns in Jin Island

2.7 果洲群岛

果洲群岛包括北果洲岛和南果洲岛,均发育完整的火山岩石柱,直径以 1.5~2 m 为主,以不规则的六边形为主,尤其在北果洲西侧保存尤为完好。次生纵节理的改造较弱,总体保存了火山岩石柱的原始形态。

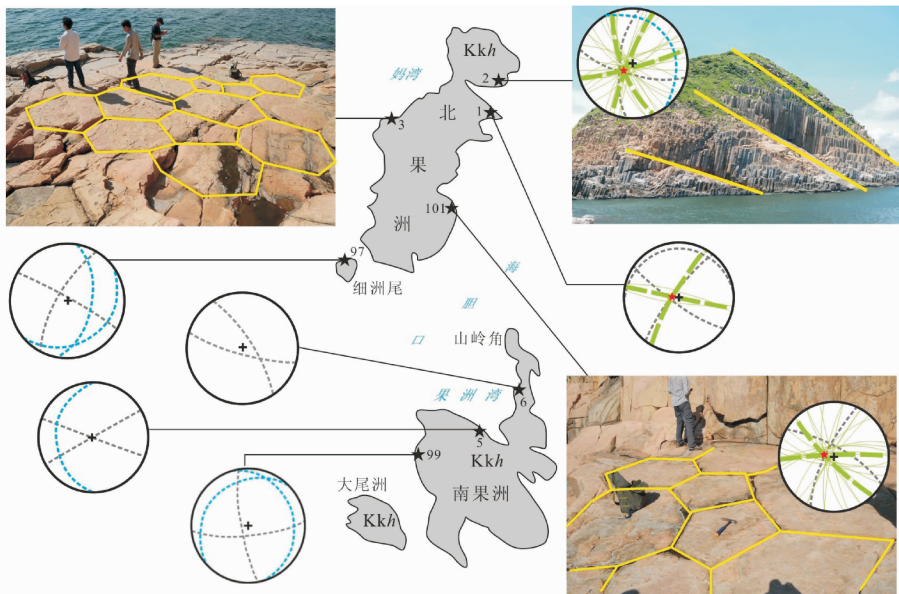


图8 果洲群岛火山岩石柱构造特征(图例说明同图2)

Fig. 8 Structural characteristics of volcanic columns in Kwo Chau Islands

3 柱状节理成因分析

熔岩冷却中形成的原生破裂构造主要为多边形柱状节理,对于火山岩原生柱状节理的研究已在自然界熔岩^[23-24]及类似物理实验^[25]中得到深入研究,这为认识熔岩的流变学特征^[26]、冷却和侵位过程提供了重要信息^[27-29]。

目前,大多数研究者认为柱状节理的形成与熔岩冷却过程中热收缩相关^[25-26, 30-31],其节理密度和石柱大小主要取决于熔岩的冷却速率,而与岩浆的成分、黏度并不存在密切关系^[29]。黏度大的酸性岩浆在成岩过程中,在一定条件下可形成柱状节理,如我国吉林四平山门白垩纪流纹岩石柱^[7]、浙江镇海四顾山、黄岩五部和古双岩霏细斑岩石柱、临海杜桥流纹斑岩石柱、浙江衢州湖南镇和临海桃渚流纹质碎斑熔岩石柱^[1]等。

香港西贡地区粮船湾组火山岩岩性单一,均为流纹质碎斑熔岩,发育柱状节理,形成规模巨大的火山岩石柱群,以规则的六方柱为主,相邻柱体之间的三联点清晰可见,呈标准的 120° 夹角。对于其成因,前人用冷凝收缩成因的观点进行了解释^[19]。

研究表明,粮船湾组火山岩属西贡破火山机构

果洲群岛发育一组与石柱柱体垂直的横节理,向北北西缓倾(350°~355°∠10°~15°),是破坏石柱的主要因素,导致石柱破裂倒伏,至少形成三级石柱平台。第一级高度由海平面延伸至高 5 m 处,第二级位于约 15~25 m 高度,第三阶一般 40~50 m,最高达 80 m(图 8)。

的中央侵出相碎斑熔岩岩穹^[19],碎斑熔岩岩浆从主喷发通道侵出后,充溢于破火山口洼地并向四周流动,在地表形成类似蘑菇状的侵出相岩穹;因其组分和结构构造相对均一,在冷凝附着面上形成规则而又间隔排列的均匀收缩中心,产生垂直于收缩方向(即流面)的张裂隙,各方向相等的张应力可通过 3 组彼此以 120° 角相交的张节理(三联点)的形成而得以释放。这些垂直于联结等距离点(收缩中心)的直线所构成的裂隙呈规则的六边形,并在垂直于冷凝面的方向上不断往岩浆深部延伸发育,从而形成六方柱体。但若冷却中心分布不均匀、或流面冷却速率存在差异,则可形成五边形甚至四边形柱体。当岩浆呈整体快速冷却时,不易形成柱状节理或形成的柱状节理形态不太规则。本次研究对大量原生柱面产状的测量统计显示,柱面产状较为分散,各个方向均有发育,其无序性也符合冷凝收缩成因模式。

火山岩的柱状节理均垂直于熔岩层面,其截面可代表熔岩流面产状^[32]。西贡地区大致以牛尾洲—吊钟洲—伙头坟洲—横洲为界,北边石柱主要向南西倾伏,南边石柱主要向北西倾伏,总体倾向南西、北西及正西。因此,推测火山中心可能在牛尾洲西侧,且粮船湾组碎斑熔岩的流向总体向东。受莲

花山断裂带的影响,火山岩石柱区次生节理发育,形成不同方向的纵节理和横节理,尤其是产状相对平缓的次生横节理对石柱群造成严重破坏,沿横节理发展的正滑断层^[16]和长期的海蚀作用,导致石柱群形成海蚀洞、断层崖等地貌,并最终形成西贡现今火山岩石柱区景观。

4 结 论

(1)香港西贡地区粮船湾组火山岩石柱截面形态以六边形为主,少量为五边形及不规则状。柱体截面直径以1~3 m为主,少数可达4~5 m。石柱发育高度一般20~30 m,少数极发育地区可高达50 m以上。石柱整体向NW和SW倾伏。

(2)香港西贡地区粮船湾组火山岩柱体发育程度各地有明显差异。万宜水库东坝、北果洲岛、吊钟洲南岸、粮船湾半岛白腊湾东岸、火石洲等地,石柱极为发育,总体规模大;伙头坟洲一横洲、粮船湾半岛西海岸、吊钟洲西海岸、牛尾洲东海岸、南果洲岛、沙塘口山北岸等地,石柱发育一般;滘西洲西海岸等地石柱不发育。

(3)香港西贡地区粮船湾组火山岩石柱三连点发育,夹角为120°,显示其古河冷凝收缩的成因;原生柱面产状统计显示其柱面产状较分散,且各个方向均有发育,说明其原生收缩冷凝成因具有无序性,符合冷凝成因模式。此外,石柱大致以倾向南西、北西及正西等三个方向发育,推测碎斑熔岩喷发中心可能在牛尾洲西侧。

致谢:本文系集体劳动成果,成文过程中得到了南京地质调查中心总工程师邢光福研究员的悉心指导,在此表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

[1] 徐松年. 浙江中生代酸性火山岩柱状节理构造的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(3): 325-332.

[2] Károly N, Ulrike M. Shallow sill and dyke complex in western Hungary as a possible feeding system of phreatomagmatic volcanoes in "soft-rock" environment [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007, 159: 138-152.

[3] Ladislav A P, Vladimir B, Sibila B S, et al. Volcanic facies analysis of a subaqueous basalt lava-flow complex at Hruškovec, NW Croatia: Evidence of advanced rifting in the Tethyan domain [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, 178: 644-656.

[4] Jiang Q, Feng XT, Hatzor Y H, et al. Mechanical an-

isotropy of columnar jointed basalts: An example from the Baihetan hydropower station, China [J]. Engineering Geology, 2014, 175: 35-45.

[5] Iddings J P. The columnar structure in the igneous rock on Orange Mountain, New Jersey [J]. Amer. Jour. Sci., 1886, 31(3): 321-331.

[6] James A V G. Factors producing columnar structure in lavas and its occurrence near Melbourne, Australia [J]. Jour. Geology, 1920, 28: 458-469.

[7] 赵明, 刘福臣. 吉林省四平市山门中生代流纹岩柱状节理特征及成因意义[J]. 吉林地质, 2003, 22(3): 57-61.

[8] 李金龙, 王璞珺, 郑常青, 等. 松辽盆地东南隆起区营城组柱状节理流纹岩特征和成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1131-1138.

[9] Andrew L S, Jocelyn M. Internal structure and emplacement of an Upper Pliocene dacite cryptodome, Milos Island, Greece [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 124: 129-148.

[10] 吕惠进. 我国酸性火山岩中的柱状节理构造景观[J]. 自然杂志, 2005, 27(1): 33-36.

[11] Roger H, Richard M, Tim J, et al. Geology of a submarine volcanic caldera in the Tonga Arc: Dive results [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2008, 176: 571-582.

[12] Yong S G. Syneruptive and intereruptive lithofacies in lacustrine environments: The Cretaceous Beolkeum Member, Wido Island, Korea [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2014, 273: 15-32.

[13] 方世明, 李江风, 伍世良, 等. 中国香港大型酸性火山岩六方柱状节理构造景观及其地质成因意义[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 89-94.

[14] 邢光福, 吴振扬, 陶奎元, 等. 香港国家地质公园粮船湾组火山岩岩石学研究[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 1079-1093.

[15] 邢光福, 孙敏, 李龙明, 等. 香港九龙破火山的地层结构与划分讨论[J]. 地质论评, 2007, 53(5): 664-674.

[16] 朱清波, 杨祝良, 沈加林, 等. 香港西贡粮船湾组火山岩石柱区次生节理研究[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 501-513.

[17] Davis D W, Sewell R J, Campbell S D G. U-Pb dating of Mesozoic igneous rocks from Hong Kong [J]. Journal of the Geological Society, 1997, 154: 1067-1076.

[18] 邢光福, 孙敏, 王步云, 等. 香港九龙复活破火山的鉴别及其地质意义[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 363-370.

[19] 邢光福, 陶奎元, 陈荣, 等. 香港西贡地区及邻近海岛地质考察报告[R]. 南京: 南京地质矿产研究所, 2008: 1-99.

[20] Bennett J D. Review of superficial deposits and weath-

- ering in Hong Kong [M]. Geotechnical Control Office, Hong Kong, 1984;51.
- [21] Campbell S D G, Sewell R J. Structural control and tectonic setting of Mesozoic volcanism in Hong Kong [J]. *Journal of the Geological Society*, 1997, 154: 1039-1052.
- [22] 魏柏林. 香港地区的断裂与地震[J]. *华南地震*, 1987, 7(2):1-9.
- [23] DeGraff J M, Aydin A. Effect of thermal regime on growth increment and spacing of contraction joints in basaltic lava [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(4): 6411-6430.
- [24] Robert W D, David T L. Anisotropic stress accumulation in cooling lava flows and resulting fracture patterns: Insights from starch-water desiccation experiments [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2009, 185: 323-336.
- [25] Goehring L, Morris S W, Lin Z. Experimental investigation of the scaling of columnar joints [J]. *Physical Review*, 2006, 74: 036115.
- [26] Lore J, Gao H, Aydin A. Viscoelastic thermal stress in cooling basalt flows [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (10): 23695-23709.
- [27] Lescinsky D T, Fink J H. Lava and ice interaction at stratovolcanoes; use of characteristic to determine past glacial extents and future volcanic hazards [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (10): 23711-23726.
- [28] Stevenson J A, McGarvie D W, Smellie J L, et al. Subglacial and ice-contact volcanism at the Öraefajökull stratovolcano, Iceland [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2006, 68: 737-752.
- [29] Grossenbacher K A, McDuffie S M. Conductive cooling of lava; columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 69: 95-103.
- [30] Budkewitsch P, Robin P Y. Modelling the evolution of columnar joints [J]. *Volcanology and Geothermal Research*, 1994, 59: 219-239.
- [31] Müller G. Starch columns: analog model for basalt columns [J]. *Journal of geophysical Research*, 1998, 103: 15239-15253.
- [32] 陶奎元. 火山岩相构造学[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1994:41-47.

Columnar joint structure of High Island Formation porphyroclastic lavas in the Hong Kong global geopark

WANG Cun-zhi, ZHU Qing-bo, YANG Zhu-liang, SHEN Jia-lin, JIANG Yang, JIN Guo-dong,
ZHOU Xiao-hua, SHI Lei

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: The columnar joints of High Island Formation are the largest rhyolitic porphyroclastic lava columns in the Sai Kung volcanic rock regions, Hong Kong global geopark. On the basis of field investigation and measurement, the authors pursue the structural features and origin of these primitive columnar joints. It shows that not all the porphyroclastic lavas of High Island Formation occurred columnar joints, the columnar joints can be divided into three types, i. e., well-developed, sub-developed (destroyed by secondary joints) and undeveloped. The sections of the volcanic columns are mainly hexagonal in shape, and partly pentagon and irregular. Their diameters are 1~3 meters and the heights are generally 20~30 meters, most of them dip steeply towards the NW-trending and SW-trending. Occurring measurements of primitive columnar joints show they have various directions in cylinder, which conforms to the contraction-condensation model, and secondary joints and marine abrasion destroyed morphologies of columnar joints.

Key words: columnar joint; rhyolitic porphyroclastic lava; High Island formation; Sai Kung; Hong Kong global geopark

