

南昌市梅岭花岗岩石蛋地貌的特征与发育机制初探

李志文^{1,2)}, 郭福生²⁾, 孙丽²⁾, 黄宝华²⁾

1) 江西省数字国土重点实验室, 南昌, 330013; 2) 东华理工大学地球科学学院, 南昌, 330013

内容提要:梅岭主要以新元古代花岗岩为地质基础,在长期的构造抬升和风化侵蚀作用下,形成了以垄状山脊/锯状山脊和侵蚀沟谷为组合的地貌特征,其代表性地貌为大小不同和圆度各异的石块堆积,广泛分布于山顶、山谷和缓山坡上,对于其形成机制,过去常被认为是冰川遗迹或倒石堆。通过研究这些石块堆积的形态特征和分布规律,笔者认为属石蛋地貌,可分为裸露型石蛋地貌和埋藏型石蛋地貌。二者的广泛分布,表明梅岭处于花岗岩地貌演化的幼年期晚期—青年期早期阶段,发育机制与当地的地质构造背景和湿热气候环境密切相关,其中的裸露型石蛋主要与埋藏型石蛋剥露、裸露岩石的球状风化和倒石堆的球状风化有关,沟谷中的石蛋流主要形成于裸露岩石崩解破碎后顺坡滚动、土体崩塌导致埋藏型石蛋出露和顺坡滚动、洪水搬运、季节性冻融作用使岩石顺坡蠕动等方式的综合作用下。埋藏型石蛋主要是在花岗岩内部裂隙和节理的控制下,形成于温度和降水对不同深度花岗岩的差异性风化作用。

关键词:梅岭; 裸露型石蛋; 埋藏型石蛋; 分布与形态特征; 形成机制

花岗岩主要形成于地壳5~30km深度,在构造抬升与风化剥蚀的共同作用下逐渐出露地表,于不同气候带、海拔高度和外营力作用区形成了类型迥异的地貌形态(崔之久等,2007)。许多学者系统研究了这些地貌的形态特征、发育机制(Campbell, 1997; Twidale, 2005; Migon, 2006; 曾昭璇, 1960; 曾昭璇和黄少敏, 1977; 梁诗经等, 2006; 魏罕蓉和张招崇, 2007; 崔之久等, 2009; 杨增海等, 2016)和旅游功能(陈安泽, 2007a, 2007b; 卢云亭, 2007; 叶张煌等, 2014)。花岗岩地貌的形成看似简单,但也是很有趣的科学问题。如,对花岗岩山脊上的壶穴,韩同林等(1998, 1999)率先提出是中国东部第四纪冰川的证据,虽得到了吕洪波等(2006)等文献的赞成,但遭到更多学者的反对(李德文等, 2003; 章雨旭, 2005; 章雨旭等, 2011; 周尚哲, 2006; 施雅风, 2010; 朱银奎, 2014)。

对以垒叠石块为特色的起伏地形,曾昭璇(1960)将其命名为石蛋地貌,并认为是山顶、山谷和缓山坡上唯一出色的特殊地貌,从而揭开了研究序幕。相关的工作将其分为裸露型石蛋和埋藏型石蛋(曾昭璇, 1960; 曾昭璇和黄少敏, 1977; 崔之久等,

2007),并着重探讨了裸露型石蛋的形态特征与分布规律(曾昭璇, 1960; 曾昭璇和黄少敏, 1977; 梁诗经等, 2006; 崔之久等, 2007),关于其形成机制,部分被认为是冰川漂砾(李培英等, 2008; 徐兴永和于洪军, 2012)或风化—剥蚀的残余物(曾昭璇, 1960; 曾昭璇和黄少敏, 1977; 施雅风等, 1989; 崔之久等, 2007)等。这些成果,为石蛋地貌的进一步研究奠定了基础,但也可以看出,对裸露型石蛋地貌的形成机制尚存在明显分歧,对埋藏型石蛋的研究更加少见。然而,在石蛋地貌的应用中,其保存状况被作为划分风化强度的主要参照物(熊广政和冯敏, 1965; Ehlen, 1999; 崔之久等, 2007),裸露程度被视为水土流失和土壤侵蚀的重要标志(曾昭璇, 1960; 曾昭璇和黄少敏, 1977; 尤联元和杨景春, 2013),体现了十分重要的理论意义和现实意义。因此,进一步揭示裸露型石蛋地貌的形成机制和埋藏型石蛋的形态特征与形成机制显得十分重要。

梅岭,地处南昌市西北郊15 km处,面积约150 km²,花岗岩出露面积占90%以上,山体上广泛分布着多种由大小不同、圆度各异的石块叠覆堆积组成的地貌景观,被归为冰川遗迹(杨石清, 2008)或倒

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41571007)、江西省数字国土重点实验室开放基金资助项目(编号:DLLJ201511)、东华理工大学地质资源经济与管理研究中心开放基金资助项目(编号:14JC01)和梅岭地质灾害实习基地建设项目的成果。

收稿日期:2016-08-18; 改回日期:2017-07-10; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.05.011

作者简介:李志文,男,1982年生。博士,讲师,主要从事地貌学与第四纪地质学研究。通讯地址:330013,江西省南昌市经开区广兰大道418号。Email: lizw1982@163.com。

石堆。笔者等对此心存疑惑,多次在此进行实地考察,并研习和参考前人成果,认为这些石块堆积属传统意义上的石蛋地貌。下文首先介绍其类型、分布规律与形态特征,然后初步探讨各类型的发育机制,希为类似地貌的研究提供初步认识与基础资料。

1 梅岭的自然地理条件

梅岭,属九岭山的东延余脉、西山脉中段,经历了长时间的地质构造运动。在中元古代,区内为巨厚的含火山碎屑的泥沙质建造(双桥山群,地质时代为1401 Ma),在新元古代的晋宁运动时期,基底褶皱回返,并伴随着含黑云母的富斜花岗岩体的侵入与混合交代作用(地质年代为1012 Ma);在加里东运动时期,地壳运动造成海陆交替的沉积环境;印支运动时期,沉积盖层发生了强烈的褶皱形变,形成了一系列规模较大的韧性剪切带和断裂带;燕山运动后期和喜马拉雅运动时期,以差异性升降和活动性断裂为主导。地壳运动长期的隆起、沉降、褶皱、

断层、侵蚀等作用,形成了中间高四周孤峰独岭的独特地貌景观(南昌市地方志编纂委员会编,1997;江西省地方志编纂委员会,2003)。这些地貌以岩浆岩为主体,占总面积90%以上,山体边缘有变质岩和沉积岩(图1a)。岩浆岩主要为新元古代花岗岩,岩性主要为中细粒二云二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩,主要矿物为石英和长石,次要矿物为黑云母、白云母、角闪石等。地貌类型上,长期的构造抬升与风化剥蚀形成了以侵蚀构造低山、侵蚀高丘、侵蚀剥蚀低丘、侵蚀剥蚀岗地等为主的低山丘陵地貌(各类型地貌的分布范围见于图1b),海拔50~841m。侵蚀构造低山主要由新元古代花岗岩组成,海拔500~841m,切割深度200~500m,冲沟发育,山脊呈锯齿状,山谷多呈V型,谷底坡度2°~5°,以线状侵蚀为主。侵蚀高丘主要由新元古代花岗岩组成,海拔300~500m,切割深度150~200m,多呈缓坡垄状山脊,丘顶形态浑圆,冲沟、拗谷发育,呈V形,以流水的线状侵蚀为主。侵蚀剥蚀低丘主要由新元古代

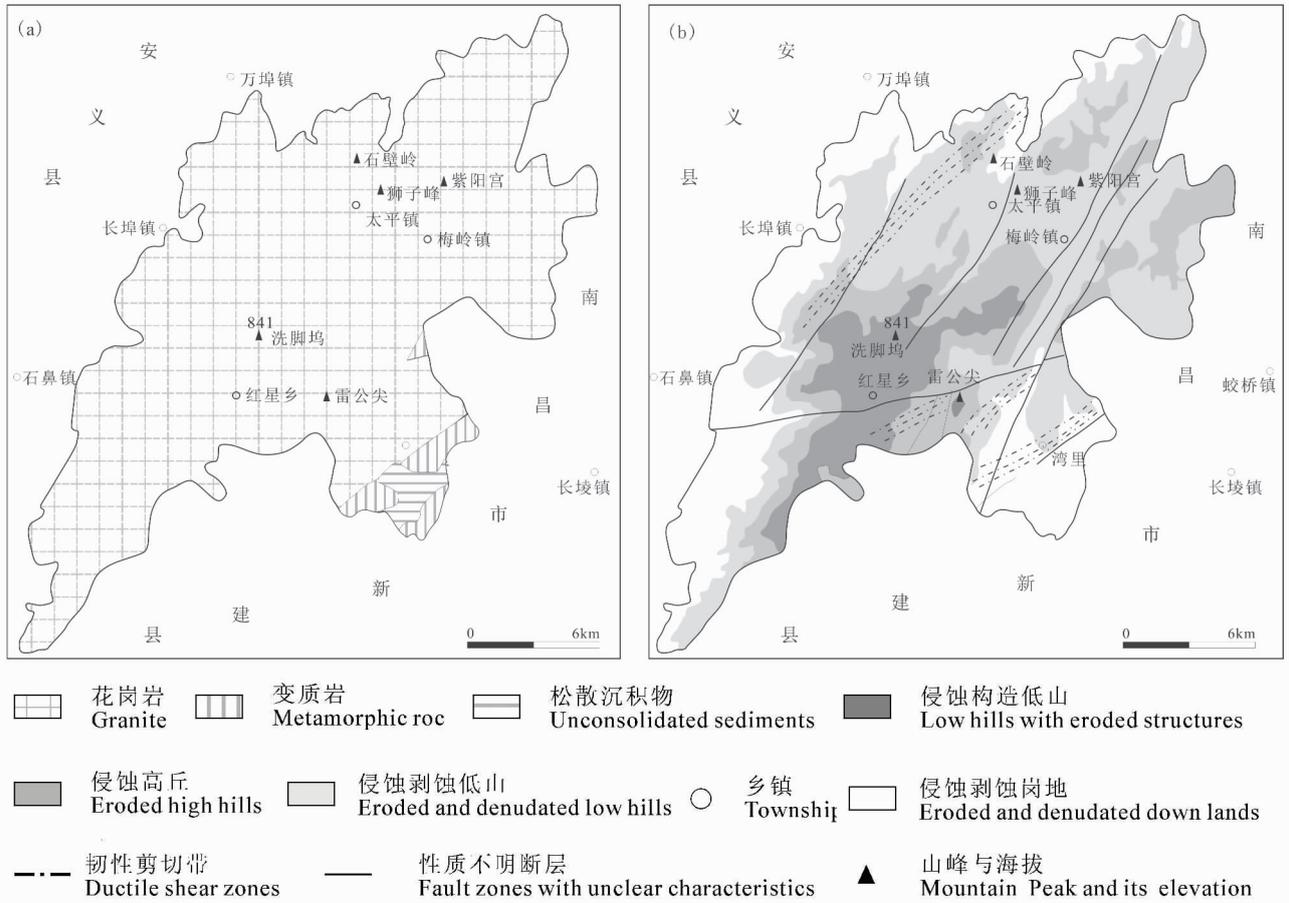


图1 梅岭的地理位置与地质地貌特征图(据江西省地质调查研究院,2007)

Fig. 1 Geographical location, geological and geomorphologic features of the Meiling Mountain (from Jiangxi Geological Survey and Research Institute, 2007)

花岗岩组成,海拔100~300m,切割深度80~200m,丘体多呈脊梁形,丘顶形态浑圆,丘间坳沟、凹地比较发育,沟谷短浅,以线状侵蚀为主,片蚀作用较强烈。侵蚀剥蚀岗地主要分布于梅岭东部,海拔30~100m,坡度 1° ~ 5° ,由古近纪磨下组、郑家渡组红色碎屑岩及第四系中更新世冲积、残积层组成,岗面微波起伏,岗缘平缓,岗间谷地宽而浅,片蚀作用较强烈(江西省地质调查研究院,2007)。这四种地貌类型的空间分布特征呈现出明显的同心圆结构,海拔由中心向四周降低,导致水系也由中心向四周分散,在海拔较高的低山、高丘和低丘地区以剥蚀和搬运作用为主,引起强烈的水土流失,基岩裸露明显,石蛋地貌广泛发育,而地势低平的岗地则以沉积作用为主,地势平缓。

气候类型属中亚热带季风气候,年均温约 17.5°C ,1月最冷(月平均气温约为 5.0°C),7月最热(月平均气温约为 29.6°C)。按季节对比,春季的平均温为 16.6°C 、夏季为 28.2°C 、秋季为 19.0°C 、冬季为 6.3°C 。年均降雨量约为1596.3mm(春季为691.3mm、夏季为520.2mm、秋季为184.2mm、冬季为200.6mm)。多年平均湿度约为77%(春季为82%、夏季为78%、秋季为72%、冬季为75%)。植物资源丰富,种属繁多,有600多属,2000余种,森林覆盖率达67%。土壤以红壤为主,低山丘陵区主要为花岗岩风化形成的花岗岩红壤和麻沙泥田,岗地平原为第四纪红色粘土红壤和黄泥田或黄泥土,水系下游为近代河积物形成的潮土和潮沙泥田(南昌市地方志编纂委员会编,1997)。

2 梅岭花岗岩石蛋地貌的类型与形态特征

研究表明,石蛋层是花岗岩弱风化强度的典型代表,其广泛存在指示地貌发育已进入幼年期晚期—青年期早期,主要见于缓慢抬升或稳定的低山(崔之久,2007)。梅岭的花岗岩地貌宏观上主要以锯齿状山脊/垄状山脊和侵蚀沟谷为组合,微观上以石蛋地貌为代表,它们或裸露于地表(称为裸露型石蛋地貌),或埋藏于风化壳中(称为埋藏型石蛋地貌),指示梅岭正处于幼年期晚期—青年期早期的花岗岩地貌演化阶段,其分布规律和形态特征如下。

2.1 裸露型石蛋地貌的分布与形态特征

裸露型石蛋地貌披露于地表,属化学风化壳剥露类花岗岩地貌(崔之久,2007),常以相互叠垒为特征(亦称叠石)。它们广泛分布于梅岭的整个山

体,宏观上主要见于侵蚀构造低山、侵蚀高丘等地貌类型上,微观上集中见于冲刷强烈的部位,如山顶和山坡的转折地段(主要为叠石,图2a)和山体拗谷中(主要为石蛋流,图2b),以相互叠垒为主要特征,直接暴露在地表,石蛋间未见或少见砂土层,植被生长稀疏(图2a、b),显示了强烈侵蚀的水土流失(曾昭璇,1960;曾昭璇和黄少敏,1977)。也见于冲刷能力较弱的部位,如自然状态的缓山坡或地势较低的侵蚀剥蚀岗地等,此处石蛋的分布相对较零散,大多数石蛋部分半埋于风化壳中,石蛋间的砂土层相对较厚,有利于植被(乔木)生长。因此,它们常被淹没在茂密的森林中,显示了中度侵蚀的水土流失(图2c)。这些地区斜坡的剖面形态主要呈现为凹形坡至直线型坡(图2b的A、B、C三条剖面线),据Penck(1953)的地貌学理论,凹形坡指示了严重的侵蚀—搬运过程,剥蚀速率强于地壳抬升速度(严钦尚和曾昭璇,1985),可能反映了梅岭属于缓慢抬升的山地。形态特征上,这些裸露型石蛋基本属于中、小露突岩型花岗岩地貌,部分石蛋的球形形态较好,主要呈次圆状—圆状的圆形或椭圆形,直径多为数十厘米;部分石蛋的球状形态较差,主要呈次棱角状—次圆状,直径多为数十厘米—数十米,某些石蛋表面还存在大小不一的风化坑或深切溶蚀裂隙。在狮子峰可见规模巨大的露突岩型花岗岩地貌(又称伯恩哈德岩)(图2d),被称为石壁岭,不仅具有规模巨大的陡峭山体,山体上至少存在3层厚层的层状卸荷裂隙(每层还有很多次一级的卸荷裂隙),并沿着裂隙面发生崩塌,在山脚形成了明显的裙状石蛋堆积和多条石蛋流。在山顶,也分布着大量裸露型石蛋,形成独具特色的地貌。

2.2 埋藏型石蛋地貌的分布与形态特征

埋藏型石蛋地貌存在于风化壳内,属于化学风化壳类花岗岩地貌(崔之久等,2007)。前人(Ehlen,1999;崔之久等,2007)根据不同深度花岗岩风化壳的形态特征,按风化程度差异划分为极强风化带、强风化带、中等风化带、弱风化带和新鲜基岩带等五个阶段。通过对梅岭花岗岩风化壳的考察与研究,也可以将其划分为上述5个阶段(图3)。极强风化带呈现为红色至赤红色的沙质土,基本不具有原岩结构,偶含直径多为数厘米的微小风化球,石英砂颗粒分布比较均匀(图3a)。强风化带呈现为红色的砂土砾石层,原岩结构大部分消失,但常见无层状剥落的多呈椭圆形的次棱角状—次圆状石蛋,大小多为数十厘米,表层的风化程度较深,地质锤轻

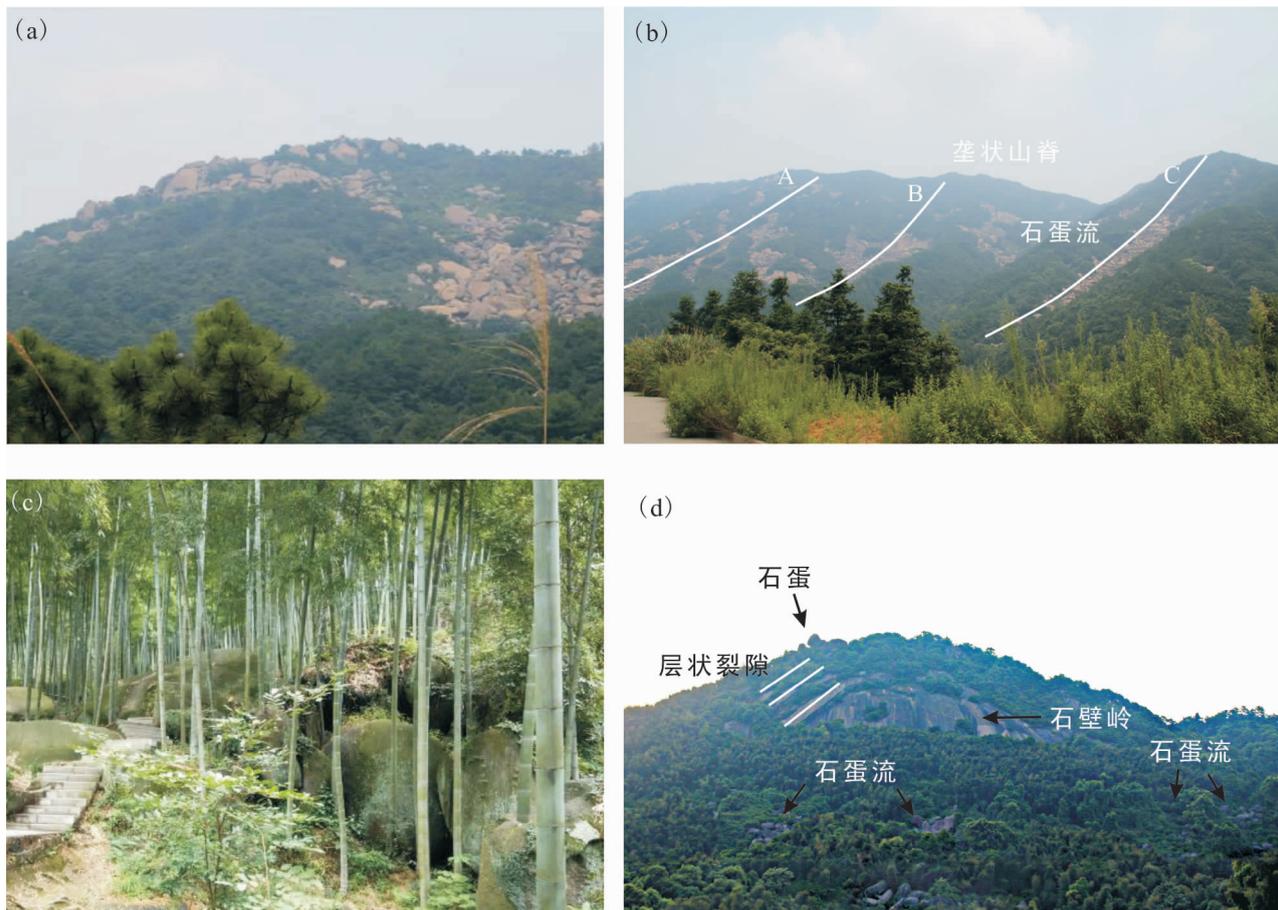


图2 裸露型石蛋的分布与形态特征: (a) 坡度转角处的裸露型石蛋地貌(红星乡); (b) 裸露型石蛋、石蛋流和凹形坡(红星乡); (c) 淹没于竹林中的裸露型石蛋地貌(狮子峰); (d) 巨型露凸岩型花岗岩地貌(狮子峰)

Fig. 2 The distribution and characteristics of exposed stone eggs: (a) The exposed stone eggs at corner along the slope in Hongxing County; (b) The exposed stone eggs, stone eggs stream and concave slope in Hongxing County; (c) The exposed stone eggs in the bamboo at the Lion Peak; (d) The giant exposed granite landform at the Lion Peak

轻敲击时可成凹坑(图3b)。中等风化带为褐黄色—灰黄色的沙土砾石层,呈半岩半土状,风化程度相对较弱,具有较明显的原岩结构,节理单元中心为已具有一定风化程度的石蛋,地质锤轻轻敲击时会破碎,表明石蛋表面的长石和云母已基本风化,呈现为褐黄色—灰黄色,其四周为具有同心圆结构的层状剥落系列,层状剥落的岩石性质自石蛋向外围逐渐减弱,沙土性逐渐增强,最终演变为砂土层(图3c)。弱风化带主要为石蛋和轻度风化的基岩。石蛋断口新鲜,地质锤敲击声清脆,往外亦为具有同心圆结构的层状剥落系列,这些层状剥落的厚度自石蛋向外围逐渐变薄,岩石性质减弱。与中等风化带相比,它们具有厚度更大,岩石性质更高的特征(图3d)。新鲜基岩带基本未风化,岩石新鲜且明亮。

3 梅岭花岗岩石蛋地貌的形成机制

根据对梅岭不同类型石蛋地貌的分布和形态特征的初步调查与分析,参考前人成果,将裸露型石蛋地貌和埋藏型石蛋地貌的可能发育过程与影响因素分析如下。

3.1 石蛋地貌发育的自然地理背景

梅岭主要由新元古代花岗岩组成。由于花岗岩的不透水性,断裂、节理和裂隙被认为是控制花岗岩发育的第一切入点(崔之久等,1996),节理稀疏岩体的抗风化—侵蚀能力强,节理密集者则弱。梅岭在多期地壳运动和构造应力的影响下,主山体形成了3条近东北—西南走向的韧性剪切带和一系列断裂带,形成了许多断裂和节理(图1b),不同方向的节理相互交错,相互切割,将巨大的岩体分割成许多

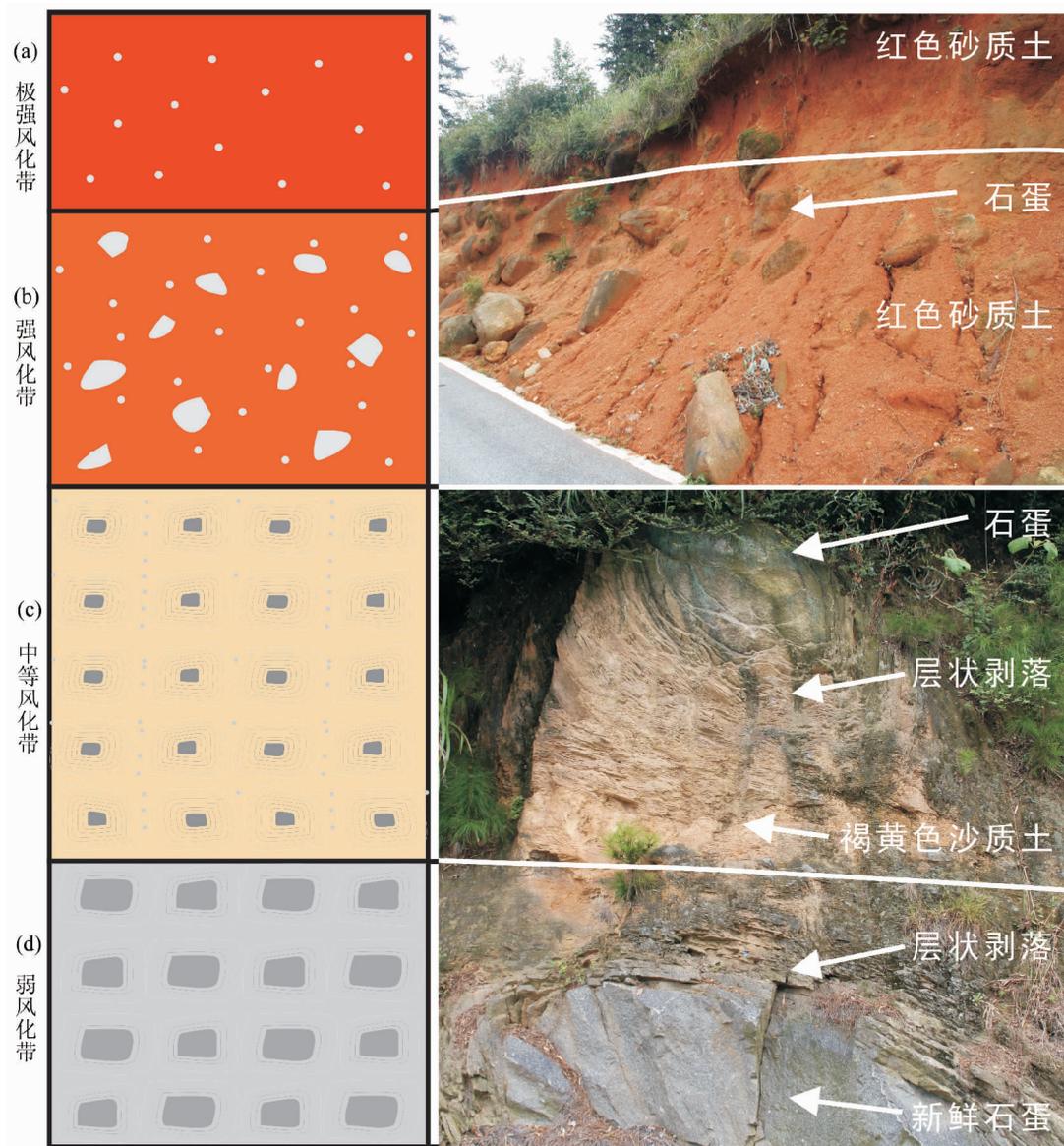


图 3 梅岭花岗岩风化壳的发育阶段

Fig. 3 The evolution stages of granite weathering crust in the Meiling Mountain

以菱形块体为主的节理单元(江西省地质调查研究院,2007)。同时,花岗岩在出露地表的过程中,上覆地层的剥蚀使岩体负载,产生许多与岩石表面大致平行的隐伏纹理和卸荷裂缝,越接近地表的岩层的裂隙越多(图 2d)(严钦尚和曾昭璇,1985)。丰富的断裂、节理和裂隙为花岗岩风化提供了重要条件,节理越发育的花岗岩,越容易发育石蛋地貌(卢云亭,2007)。快速抬升的花岗岩山地,侵蚀—搬运作用较强,风化作用不容易深入岩石内部,难发育完整的风化壳序列,经常形成以“山峰+峡谷”为主的地貌类型,如黄山、三清山等的石林和峰林。而缓慢抬升的花岗岩山地,风化作用可以沿着各种断裂、节

理和裂隙深入岩石内部,影响着花岗岩石块的四方六面,逐渐形成内含石蛋层的厚层风化壳(崔之久等,2007)。风化过程也伴随着侵蚀—剥蚀作用,松散的风化碎屑被逐渐搬运、剥蚀,使石蛋层出露地表,形成石蛋地貌。梅岭属于缓慢抬升型山地,长期的风化作用有助于形成深厚的风化壳剖面,但湿热气候下发生的强烈剥蚀和搬运作用,使风化碎屑被搬运流失,许多斜坡的剖面形态呈现为凹形坡至直线型坡(图 2a),大量岩石崩解破碎、埋

藏型石蛋裸露,形成裸露 g 型石蛋地貌。

梅岭花岗岩主要为中细粒二云二长花岗岩、黑云母花岗闪长岩,主要矿物为石英和长石,次要矿物为黑云母、白云母、角闪石等。这种由多种矿物组成的复矿岩特征也有助于发育石蛋地貌。虽然各矿物之间具有完美的镶嵌结构且质地坚硬,但不同矿物的膨胀系数与抗风化能力等特性均不相同,如在 50℃ 时,长石的膨胀系数是 1.7×10^3 , 石英为 3.53×10^3 , 角闪石为 2.84×10^3 ; 石英和长石某些晶轴方向的线膨胀系数为其他晶轴方向的 20 倍(严钦尚和曾昭璇,1985)。抗风化能力方面,上述造岩矿物

处于鲍文反映系列的不同阶段(宋春青和张振春, 2000),具有不同的稳定性,如石英十分稳定,钾长石和斜长石较稳定,黑云母和角闪石不稳定,很易风化。因此,在温度和降水的影响下,会产生不同程度的膨胀—收缩和风化—分解,削弱颗粒间的粘结力,破坏岩石的镶嵌结构和整体性,促进岩石风化。

梅岭雨热同期和日温差和年温差较大的气候环境也有利于花岗岩风化。夏季正午的气温经常超过 35°C ,阳光照射使花岗岩岩面迅速升温,经过多次实地测量,其温度可超过气温的 $60\% \sim 70\%$,达到 60°C 以上,使岩石表层迅速升温 and 膨胀,晚上的温度则降低至 20°C 以下,不仅使岩石冷却和收缩,还会使空气中的水汽凝结成雨雾,浸润至矿物间的小裂缝中,加剧矿物的膨胀—收缩和风化—水解作用(严钦尚和曾昭璇,1985)。而午后的强对流雨,使这一过程变得更加迅速,强降雨使岩层表面迅速降温,表层矿物迅速收缩,产生大量微小裂隙,有助于水分的深入,再加上水体呈酸性,更有利于风化作用快速进行与深入岩石内部。

3.2 裸露型石蛋地貌的发育机制

通过对梅岭裸露型石蛋地貌的多次考察,按物质来源与形成机制,分为埋藏型石蛋/岩石的剥露、倒石堆的球状风化和裸露岩石的球状风化。由于它们暴露于地表,直接与大气、水、微生物等接触,具有十分迅速的风化过程。

埋藏型石蛋/岩石剥露:致密的花岗岩不利于水分下渗,而风化壳的储水能力有限。在强降雨条件下,容易在地表形成散流和暴雨,侵蚀和搬运风化产物,使埋藏型石蛋/岩石逐渐裸露于地表。梅岭长期的构造抬升和风化剥蚀,使埋藏型石蛋/岩石逐渐暴露于地表并相互叠覆堆积,形成石蛋地貌。而长时间的地下风化作用使其埋藏型石蛋具有圆化程度高、规模小的特征。

倒石堆的形成过程:梅岭花岗岩的垂直节理/裂隙十分发育,不仅有利于水分渗入,使黑云母、角闪石、斜长石等不断被水解和风化,破坏岩石的镶嵌结构与整体性,同时,温度变化使矿物产生不同的膨胀程度和变形量,导致颗粒相互挤压成微小隆起或拉伸成微小裂缝,削弱彼此之间的聚结力,使水分渗入和进一步风化。这些过程使节理/裂隙两侧岩体的表面被风化为许多碎屑和岩粒,随后被流水搬运流失,使节理/裂隙进一步加深、变宽。随着此风化过程的不断进行,节理/裂隙逐渐深入岩石内部并向两侧扩展,形成深切溶蚀裂隙(图4a),最终可能横切

岩石,使岩石崩解破碎成小块岩石。在重力作用下,岩石脱离母体并发生一定位移(图4b和图4c),甚至沿着山坡滚落形成倒石堆(图4d)。图4c—图4d再现了倒石堆的形成过程。可以看出,图4c中岩块②和岩块①虽然有一定位移,但从外观上看,岩块①右侧和岩块②左侧十分相似,可以还原组合在一起,说明岩块②是从岩块①右侧剥离出来的,剥裂面仍然比较新鲜,菱角分明。同样也可以看出,岩块③是从岩块②右侧剥落、岩块④从岩块③右侧剥落的。剥落的石块在重力作用下发生位移(图4b和图4c),甚至顺着斜坡向下翻滚(岩块④和岩块③位于悬崖边上),形成倒石堆(图4d是图4c下方的倒石堆)。图4a至图4d展示了岩石内部“沿节理/裂隙风化—深切溶蚀裂隙—剥离位移—滚落堆积”的多个连续过程,以空间代替时间,呈现了裸露岩石破碎并形成倒石堆的过程,而且风化过程仍在继续,图4c岩块①的表面又形成了新的溶蚀裂隙。这些倒石堆成为石蛋地貌的重要物质来源。

裸露岩石的球状风化:裸露于地表的岩石(包括裸露岩石、石块、倒石堆和剥露的埋藏型石蛋),会经过后期的球状风化而逐渐圆化。受雨热同期、日温差和季节温差悬殊的亚热带季风气候影响,白天的阳光照射使裸露岩石的岩面迅速升温,矿物和岩石表面体积膨胀。但由于花岗岩是热的不良导体,内部岩石的升温速度慢且幅度小,导致矿物的膨胀程度少。晚上的温度降低,岩面迅速降温、矿物和岩石表面体积快速收缩,而内部岩石却因向外部传导热力的速度慢而导致降温速度慢,甚至受外部岩石传导热力的影响而仍然处于升温状态,矿物的收缩程度较少,相对于表面岩石而言,整体处于膨胀的状态。这一过程导致岩面的胀缩变化大而内部稳定,使岩石的内外层间产生差异胀缩,当这种力量超过岩石应力时,就会形成层裂甚至层状剥落,层裂面与变温层大体相当(如图4e和图4f表面的层状剥落)(严钦尚和曾昭璇,1985)。尤其是在午后强降雨的影响下,岩面迅速降温而内部岩石较慢,进一步加剧了内外层的差异胀缩,造成层状剥落(周学军和夏卫生,2004)。对于棱角分明的裸露岩石,棱角部位因与空气的接触面增大,表面积增大(角部受三个方向的风化,棱边受两个方向的风化),受温度和降水的影响更大,矿物的热胀冷缩、湿胀干缩和差异风化等作用更加显著,更容易使岩块剥落或形成风化孔洞(如图4f棱边的层状脱落和棱上的大量孔隙),有助于岩石进一步圆化,形成圆化程度较高的



图 4 倒石堆的形成过程图：(a) 深入花岗岩内部的溶蚀裂隙(紫阳宫)；(b) 溶蚀裂隙导致花岗岩破碎并发生位移(狮子峰)；(c) 溶蚀裂隙导致花岗岩多次破碎并发生位移(紫阳宫)；(d) 花岗岩破碎后沿斜坡滚落形成倒石堆(紫阳宫)；(e) 花岗岩表面的层状剥落(紫阳宫)；(f) 花岗岩表面、棱边和棱角上的层状剥落(紫阳宫)

Fig. 4 The formation process of the talus: (a) the dissolution fracture within the granite; (b) The crushing and displacement of granite caused by dissolution fracture; (c) repeated crushing and displacement of granite caused by dissolution fracture; (d) The talus formed by granite rolling along the slope after crushing; (e) The lamellar spalling on the granite surface; (f) The lamellar spalling on the granite surface, edge and corner

石蛋地貌。

众多石蛋常常聚集在沟谷形成石蛋流,亦是梅岭的特色地貌,尤以红星乡最突出(图2b)。经过多次实地考察与研究,结合前人成果,初步推测石蛋流的成因如下:

(1) 岩石在风化崩解过程中,在重力作用下,沿着坡面向下滚动,聚集在地势较低的沟谷中,形成倒石堆(图4c—d)。

(2) 强降雨时,水分下渗导致花岗岩风化壳的含水量迅速增加,增加了土体的塑性和重量,容易诱发滑坡、崩塌等地质灾害(杨永革,2011),崩落的风化壳直接导致埋藏型石蛋裸露,并在重力作用下翻滚至沟谷中。

(3) 花岗岩的不透水性导致水的下渗量有限,容易在地表形成洪流或泥石流,其强大的搬运能力将部分石蛋搬运至沟谷中(周学军和夏卫生,2004)。

(4) 梅岭虽属亚热带季风区气候,但冬季也存在短期的季节性冰雪冻融作用(南昌市地方志编纂委员会编,1997),更何况是在地质历史上的冰期。

地面冻结时的体积膨胀,将岩石抬升,解冻后,土体塑性增强,岩石在重力的影响下向下滑动一定距离(严钦尚和曾昭璇,1985)。反复进行的冻融作用使岩石逐渐移动至沟谷中。在这些因素的综合影响下,石蛋逐渐向低洼地带或沟谷集中,形成石蛋流。

3.3 埋藏型石蛋地貌的发育机制

梅岭花岗岩风化壳的风化程度呈现出自上而下减弱的特征。由于花岗岩的不透水性,不仅使水分只能沿着断裂、节理和裂隙逐渐向下渗入,也使水分难以下渗流失,而是长期活跃在风化壳内,促进风化作用的不断深入与强化(崔之久等,2007)。梅岭花岗岩的节理丰富,巨大的岩体被分割成许多菱形块体。后期也形成了许多风化节理,如温度变化引起风化壳中岩石内外层间的差异膨胀和收缩,这种胀缩作用向节理处释放应力,当节理末端的应力超过花岗岩的抗剪能力时,则会形成平行于节理的层裂。降水尤其是强降水使水分迅速渗入岩石,使节理附近的岩面率先变温,也会引起内外层间的差异膨胀和收缩,进而产生以节理为单元的层状裂隙(图3c和图3d)(周学军和夏卫生,2004)。由于温度和降

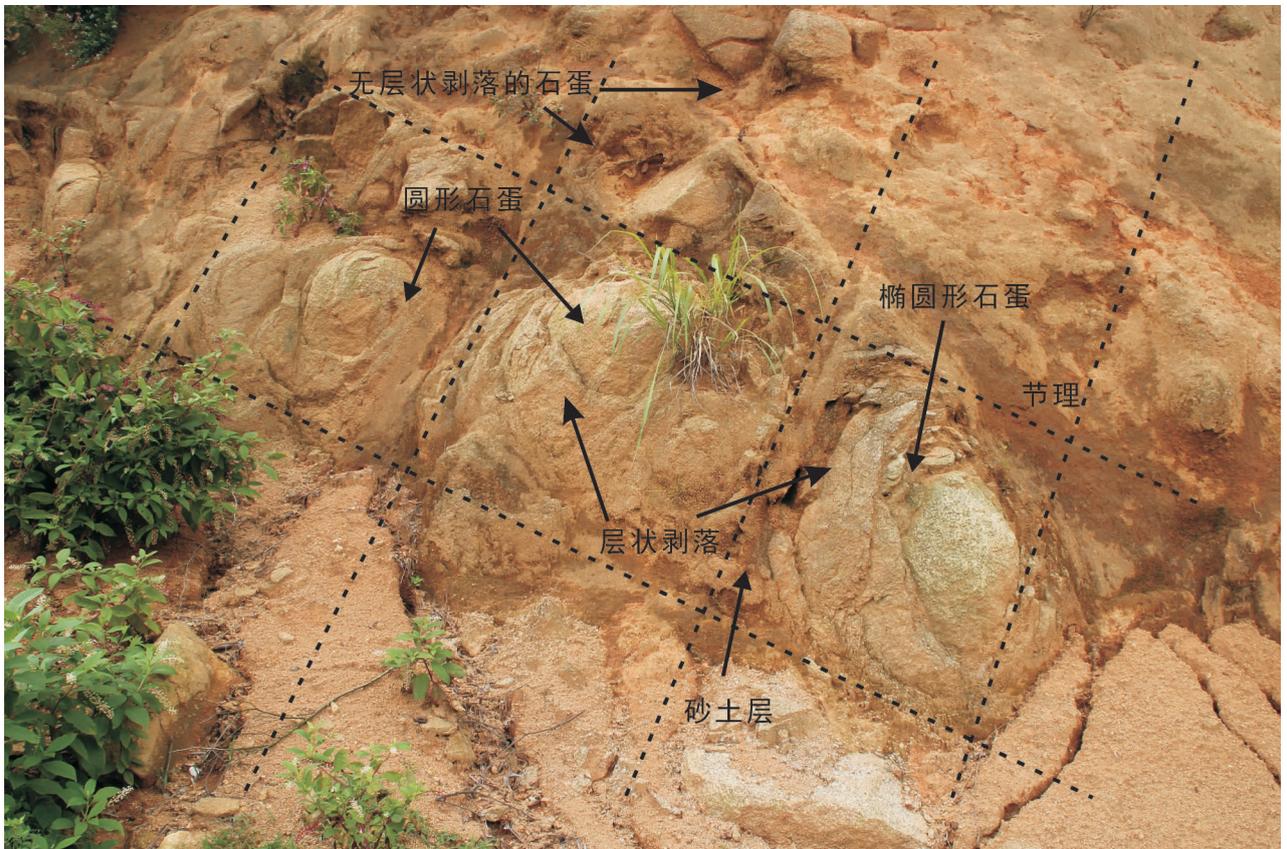


图5 埋藏型石蛋与节理的关系(牛岭村)

Fig. 5 The relationship between buried stone eggs and the joint

水对风化壳的影响自上而下减弱,导致风化节理的数量和规模也逐渐较少。当水分沿着节理/裂隙深入岩石内部后,节理两侧的水分、氧气和含酸量增加,使斜长石、角闪石和黑云母等不稳定矿物氧化或水解,留下石英等抗风化能力强的稳定矿物。同时,水分也可以沿着层状裂隙进入节理单元,顺着层状裂隙逐渐向岩石内部风化,将层状花岗岩逐渐风化,使原始的岩石结构逐渐消失,沙土性逐渐增强。在

剖面的最上部,经历的风化作用时间最长,所有的岩石基本被风化成沙质土壤,不稳定矿物晶格中的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} , 呈现为红色至赤红色,形成极强风化带(图 3a);在其下部,温度和降水的影响减弱,水分沿着节理进入石蛋的层状裂隙,由于层状花岗岩较薄,更频繁地接受温度和降水的影响,快速被风化为沙质土壤,不稳定矿物晶格中的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} , 主要呈现为红色。但节理单元中心的石蛋

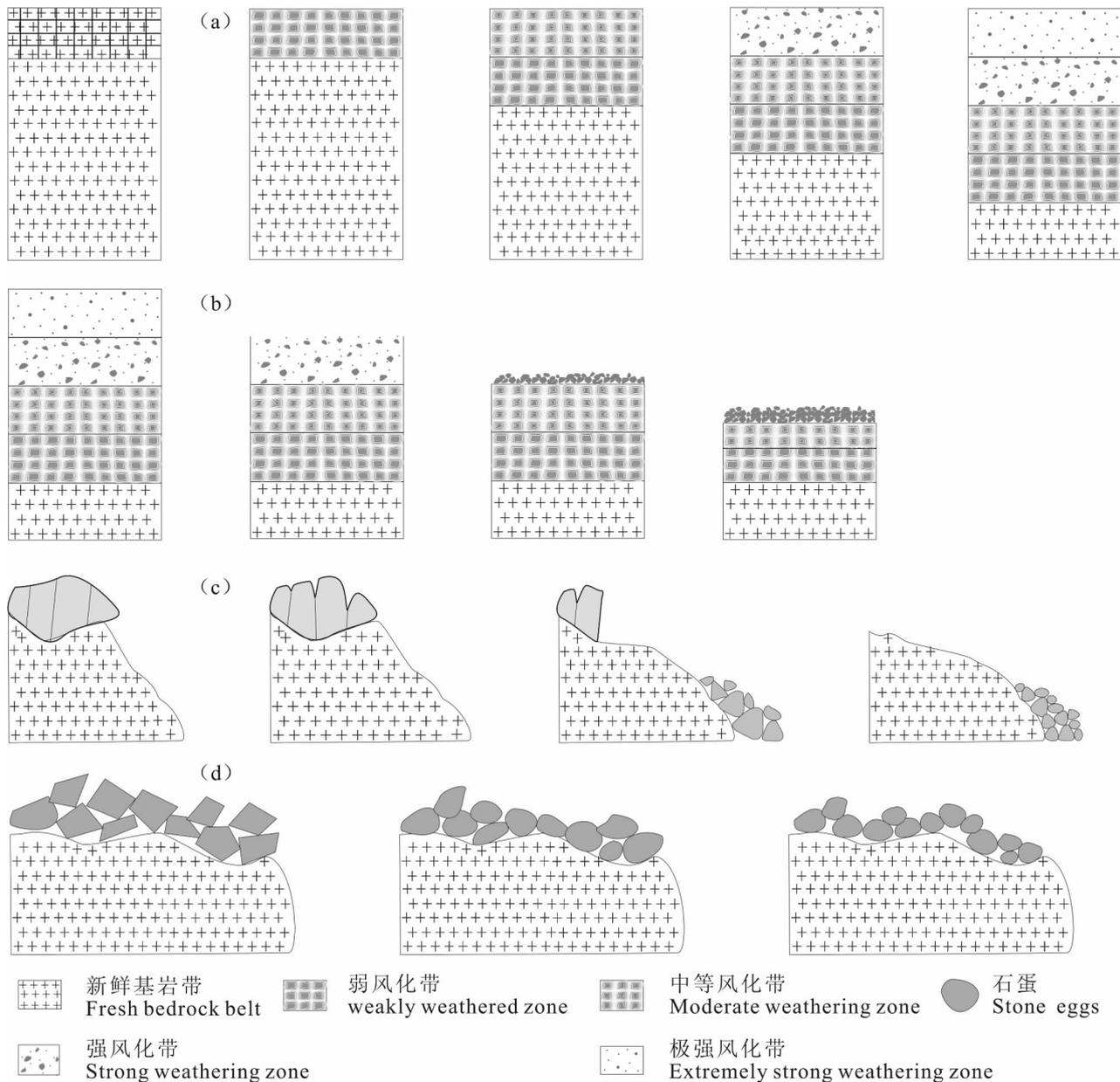


图 6 石蛋地貌的发育过程: (a) 埋藏型石蛋的发育过程; (b) 埋藏型石蛋的剥露过程; (c) 裸露岩石破碎和倒石堆的形成过程; (d) 裸露岩石的球状风化过程

Fig. 6 The development process of stone eggs landform in the Meiling Mountain: (a) The development process of buried egg; (b) The exhumation process of buried stone eggs; (c) The breaking of exposed rock and the formation process of talus; (d) The spherical weathering process of exposed rock

与水分接触较少,仍然有所保存,成为沙土砾石层,称强风化带(图3b和图5中无层状剥落的石蛋层)。再往下,风化节理减少、温度和渗水量也进一步减少,导致风化速度较慢、风化程度较弱。对某个节理单元,水分沿着层状裂隙逐渐向单元中心风化,导致风化程度自节理处向节理单元中心逐渐减弱,从而将层状花岗岩风化成系列具有同心圆结构的层状风化晕,在节理中心仍然保留着轻度风化的石蛋。相邻节理单元交界处的风化程度最深,常为含大量石英砂砾的砂土层,形成半岩半土的中等风化带(图3c和图5中有层状剥落的石蛋层)。再往下,节理更加稀疏,温度和渗水的影响更弱,风化作用亦是由节理处向节理单元中心逐渐风化,风化程度也是由外向内减弱,但由于风化程度较低,再加上层状剥落的厚度较大,保留了较强的原岩结构,尤其是节理单元中心,基本未受风化作用的影响,为新鲜的母岩型石蛋(图3d)。再往下则为基岩,温度和降水难以到达,基本未被风化。由于水分是由节理处向节理单元中心逐渐深入,因此,立方系统节理中的石蛋常呈圆形,长方系统节理中则多呈椭圆形,其大小视节理间隔和风化程度而定(图5)。

4 梅岭石蛋地貌的形成过程

通过上述对石蛋地貌的类型、形态特征和形成机制的分析,得出石蛋地貌的形成过程如下:裂隙、温度和降水是影响花岗岩风化的最重要因素,快速抬升的花岗岩山地形成以“山峰+峡谷”为主的地貌类型。缓慢抬升的花岗岩山地,由于受到长期的物理—化学风化作用,形成深厚的内含多层埋藏型石蛋的风化壳剖面,风化程度自上而下减弱,形成极强风化带—强风化带—中等风化带—弱风化带—新鲜基岩带序列(图6a)。由于梅岭属于亚热带季风气候,湿热气候下发生强烈的剥蚀和搬运作用,使极强风化带、强风化带甚至中等风化带的风化碎屑被搬运流失,大量埋藏型石蛋裸露,形成裸露型石蛋地貌(图6b)。这些裸露的岩石(包括裸露岩石、石块、倒石堆和剥露的埋藏型石蛋),被风化作用沿着节理或裂隙发生风化—水解—剥蚀等作用,逐渐崩解破碎,形成倒石堆或碎块岩石(图4a—d、图6c)。所有的裸露岩石,由于棱边和棱角部位与空气的接触面积大,更容易受风化作用的影响,使棱角不断消失,圆化程度提高,形成裸露的石蛋地貌(图6d)。

5 结论

通过对梅岭石蛋地貌的多次考察与研究,参考

前人成果,得出初步结论如下:

梅岭花岗岩地貌以垄状山脊/锯状山脊和沟谷地貌组合为主,石蛋地貌尤其是埋藏型石蛋的广泛分布,表明梅岭正处于花岗岩地貌演化阶段的幼年期晚期—青年期早期阶段。

梅岭石蛋地貌发育于当地地质构造和湿热气候的综合影响下。裸露型石蛋地貌的形成机制主要为埋藏型石蛋剥露、裸露岩石的球状风化和倒石堆的球状风化;埋藏型石蛋主要是在花岗岩内部裂隙和节理的控制下,形成于温度和降水对不同深度花岗岩的差异性风化作用。

沟谷中的石蛋流主要形成于裸露岩石崩解破碎后顺坡滚动、土体崩塌导致埋藏型石蛋出露和顺坡滚动、洪水搬运、季节性冻融作用使岩石顺坡蠕动等方式的综合作用下。并在重力的牵引下,反复顺坡移动后聚集于沟谷中。

致谢:感谢张招崇教授和编辑部提出的宝贵意见。叶长盛、王丰年、韦恒叶、朱志军、黎广荣等老师参与野外考察和有益讨论,硕士生李子康、游为、韩世明和马泽源等同学参与野外考察,一并致谢。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 陈安泽. 2007a. 中国花岗岩地貌景观若干问题讨论. 地质论评, 53 (增刊): 1~10.
- 陈安泽. 2007b. 中国花岗岩旅游地貌类型划分初论及其意义. 国土资源导刊, (6): 47~51.
- 崔之久, 陈亿鑫, 杨晓燕. 2009. 黄山花岗岩地貌特征、分布与演化模式. 科学通报, 54(21): 3364~3373.
- 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 潘保田, 陈怀录. 1996. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度. 科学通报, 41(15): 1402~1406.
- 崔之久, 杨建强, 陈艺鑫. 2007. 中国花岗岩地貌的类型特征与演化. 地理学报, 62(7): 675~690.
- 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 1998. 河北省丰宁县喇嘛山冰臼群的发现及意义. 中国区域地质, 17(1): 103.
- 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 1999. 河北内蒙古发现罕见冰臼群. 地质论评, 45(5): 456~462.
- 江西省地质调查研究院. 2007. 江西省南昌市湾里区及安义县地质灾害调查与区划报告.
- 江西省地方志编纂委员会. 2003. 江西省自然地理志. 北京: 方志出版社, 14~63.
- 李德文, 崔之久, 李洪江, 南凌. 2003. 华北北部花岗岩风化穴形成机制与环境意义. 南京大学学报(自然科学), 39(1): 120~128.
- 李培英, 徐兴永, 赵松龄. 2008. 海岸带黄土与古冰川遗迹. 北京: 海洋出版社.
- 梁诗经, 文斐成, 陈斯盾, 揭育金, 魏勇, 胡祚林. 2006. 福建石牛山水蚀花岗岩石蛋地貌特征及成因研究. 福建地质, (2): 65~74.
- 卢云亭. 2007. 中国花岗岩风景地貌的形成特征与三清山对比研

- 究. 地质论评, 53(增刊): 85~90.
- 吕洪波, 任晓辉, 杨超. 2006. 赤峰等地第四纪大陆冰川的地貌证据. 地质论评, 52(3): 379~385.
- 南昌市地方志编纂委员会. 1997. 南昌市志 1. 北京: 方志出版社, 211~216.
- 施雅风, 崔之久, 李吉均. 1989. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 科学出版社.
- 施雅风. 2010. 韩同林的“冰臼论”是对花岗岩类岩石“负球状风化”的误解. 地质论评, 56(3): 349~354.
- 宋春青, 张振春. 2000. 地质学基础(第三版). 北京: 高等教育出版社.
- 魏罕蓉, 张招崇. 2007. 花岗岩地貌类型及其形成机制初步分析. 地质论评, 53(增刊): 147~158.
- 熊广政, 冯敏. 1965. 花岗岩红色风化壳的特征. 中国第四纪研究, 4(2): 55~67.
- 徐兴永, 于洪军. 2012. 冰消期地貌. 北京: 海洋出版社.
- 严钦尚, 曾昭璇. 1985. 地貌学. 北京: 高等教育出版社.
- 杨石清. 2008. 江西南昌梅岭国家森林公园总体规划. 安徽农业科学, 36(28): 12208~12209.
- 杨永革. 2011. 江西省南昌市湾里区及安义县地质灾害及防治对策. 地质灾害与环境, 22(1): 22~26.
- 杨增海, 王建平, 刘家军, 王守光, 王清义, 康书光, 张捷先, 赵云. 2016. 内蒙古乌日尼图花岗岩的年代学地球化学及其地质意义. 现代地质, 30(3): 528~540.
- 叶张煌, 尹斌, 刘嘉麒, 王安建, 陈安泽, 闫强. 2014. 江西省“三清山式”花岗岩地貌景观发育机制探讨. 地球学报, 35(6): 769~775.
- 尤联元, 杨景春. 2013. 中国地貌. 北京: 科学出版社, 318~326.
- 曾昭璇, 黄少敏. 1977. 中国东南部花岗岩地貌与水土流失问题. 广东师院学报(自然科学版), (6): 46~61.
- 曾昭璇. 1960. 岩石地形学. 北京: 地质出版社: 21~34.
- 章雨旭, 刘恋. 2011. 山脊壶穴不能作为东部第四纪冰川的证据. 科技导报, 29(33): 62~68.
- 章雨旭. 2005. “冰臼”成因争鸣——以克什克腾旗青山岩白群为例. 地质论评, 51(6): 680, 712.
- 周尚哲. 2006. 锅穴一定是第四纪冰川的标志吗? 第四纪研究, 26(1): 117~125.
- 周学军, 夏卫生. 2004. 我国东南部花岗岩古地貌与现代侵蚀关系的研究——以湖南衡山为例. 中国水土保持科学, 2(2): 28~34.
- 朱银奎. 2014. 崂山花岗岩山脊壶穴的特征及成因探讨. 地质论评, 60(2): 397~408.
- Campbell E M. 1997. Granite landforms. Journal of the Royal Society of Western Australia, 80(3): 101~112.
- Chen Anze. 2007#. The preliminary discussion on the classification of Chinese granite tourism and its significance. Land Resources Guide, (06): 47~51.
- Chen Anze. 2007#. Some problems of granite geomorphological landscapes. Geological Review, 53(supplement): 1~10.
- Cui Zhijiu, Chen Yixin, Yang Xiaoyan. 2009#. Granite landform characteristics, distribution and evolution patterns in Huangshan Mt. Chinese Science Bulletin, 54(21): 3364~3373.
- Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, Pan Baotian, Chen Huailu. 1996#. The initial elevation of palaeokarst and planation surfaces on Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 42(11): 934~938.
- Cui Zhijiu, Yang Jianqiang, Chen Yixin. 2007#. The Type and Evolution of the Granite Landforms in China. Acta Geographica Sinica, 62(7): 675~690.
- Ehlen J. 1999. Fracture characteristics in weathered granite. Geomorphology, 31: 29~45.
- Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. 1998#. Discovery of moulins in Mount Lama, Fenglin, Hebei, and its significance. Regional Geology of China, 17(1): 103.
- Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. 1999#. Rare moulin swarms discovered in the medium—low mountains areas in Hebei and Inner Mongolia. Geological Review, 45(5): 456~462.
- Jiangxi Geological Survey and Research Institute. 2007#. The report of geological disaster investigation and regionalization of Wanli District and Anyi County, Nanchang Jiangxi province.
- Jiangxi Provincial Local Records Compilation Committee. 2003#. Natural geography of Jiangxi Province. Beijing: Chronicles Press, 14~63.
- Li Dewen Cui Zhijiu, Li Hongjiang Nan Lin. 2003#. Genesis of granitic tofonis of northern North China and its environmental significance. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 39(1): 120~128.
- Li Peiying, Xu Xingyong, Zhao Songling. 2008#. The Loess and the Paleo-Glaciation Remains in the Coastal Zone of China. Beijing: China Ocean Press.
- Liang Shijing, Wen Feicheng, Chen Sidun, Jie Yujin, Wei Yong, Hu Zuolin. 2006#. On the landform characteristics and genesis of Waterworn Granite Pebbly in the Shinui Hill, Fujian Province, Geology of Fujian, (2): 65~74.
- Lu Yunting. 2007#. Characteristics of Granite Landscapes in China: Comparison to the Sanqing Mountain. Geological Review, 53(supplement): 85~90.
- Lv Hongbo, Ren Xiaohui, Yang Chao. 2006#. Landform Evidences of Quaternary Continental Glaciation in Chifeng and the Vicinity Areas, North of China. Geological Review, 52(3): 379~385.
- Migon P. 2006. Granite landscapes of the world. Oxford University Press.
- Nanchang Local Chronicle Compilation Committee. 1997#. Chorography of Nanchang, Part 1. Beijing: Chronicles Press, 211~216.
- Penck W. 1953. Morphological Analysis of Landforms. London: Macmillan, 439.
- Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun. 1989#. Problems on Quaternary Glaciation and Environments in Eastern China. Beijing: Science Press: 1~462.
- Shi Yafeng. 2010#. Comments on the Moulin argument provided by Mr. HAN Tonglin, a misunderstanding of granite negative spheroidal weathering. Geological Review, 56(3): 349~354.
- Song Chunqing, Zhang Zhenchun. 2000#. Fundamentals of Geology (Third Edition). Beijing: Higher Education Press.
- Twidale C R. 2005. Landforms and Geology of granite terrain. A Balkema Publishers.
- Wei Hanrong, Zhang Zhaochong. 2007#. Types of granite landscapes and discussions on their formation processes. Geological Review, 53(supplement): 147~158.
- Xiong Guangzheng, Feng Min. 1965#. The characteristics of weathering granite regolith[J]. Quaternaria Sinica, 1965, 4(2): 55~67.
- Xu Xingyong, Yu Hongjun. 2012#. Deglaciation landform. Beijing: Ocean Press.
- Yan Qinshang, Zeng Zhaoxuan. 1985#. Geomorphology. Beijing: Higher Education Press.
- Yang Shiqing. 2008#. Overall Planning of Meiling National Forest Park in Nanchang City of Jiangxi. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 36(28): 12208~12209.
- Yang Yongge. 2011#. Geohazards and their prevention in Wanli district and Anyi county, Nanchang. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 22(1): 22~26.

- Yang Zenghai, Wang Jianping, Liu Jiajun, Wang Shouguang, Wang Qingyi, Kang Shuguang, Zhang Jiexian, Zhao Yun. 2016#. Geochronology and geochemistry of the wurinitu Granites in Inner Mongolia and Their Geological Implications. *Geoscience*, 30(3): 528 ~ 540.
- Ye Zhanghuang, Yin Bin, Liu Jiaqi, Wang Anjian, Chen Anze, Yan Qiang. 2014#. A Tentative Discussion on the Development Mechanism of "Mt. Sanqingshan Style" Granite Landform, Jiangxi Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(6): 769 ~ 775.
- You Lianyuan, Yang Jingchun. 2013#. Chinese landform. Beijing: Science press, 318 ~ 326.
- Zeng Zhaoxuan, Huang Shaomin. 1977#. Granite landform and soil erosion in Southeast China. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, (6): 46 ~ 61.
- Zeng Zhaoxuan. 1960#. Lithogeneous Topography. Beijing: Geological Publishing House; 21 ~ 34.
- Zhang Yuxu, Liu Lian. 2011#. Potholes on Hilltops is Not the Evidence for Quaternary Glacier in Eastern China. *Science & Technology Review*, 29(33): 62 ~ 68.
- Zhang Yuxu. 2005#. The controversy about the origin of "Moulin" — take the Moulin in the Hexigten for example. *Geological Review*, 51(6): 680, 712
- Zhou Shangzhe. 2006#. Are all potholes markers of quaternary Glaciations. *Quaternary Sciences*, 26(1): 117 ~ 125.
- Zhou Xuejun, Xia Weisheng. 2004#. Relationship of Ancient-landform and Modern Erosion of Granite Areas in Southeast of China—Take Hengshan mountain in Hunan as an Example. *Science of Soil and Water Conservation*, 2(2): 28 ~ 34.
- Zhu Yinkui. 2014#. Characteristics and Origin of Granite Hilltop Potholes in Mount Laoshan. *Geological Review*, 60(2): 397 ~ 408.

The Characteristic and Formation Mechanism of Granitic Rock Eggs in the Meiling Mountain, Nanchang

LI Zhiwen^{1,2)}, GUO Fusheng²⁾, SUN Li²⁾, HUANG Baohua²⁾

1) Key Laboratory for digital land of Jiangxi Province, Nanchang, 330013;

2) School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, 330013

Abstract: The Meiling Mountain is mainly composed of Upper-Proterozoic granite. After long-term tectonic uplift and weathering erosion, the mountain landscape is displaying jagged ridge or ridge combining with erosion valley, among which the representative landscape is stacked stone with different size and roundness, widely distributed at the peak, or in the valley and on the hillside. To its formation mechanism, previous studies used to consider it as glacial gravel or talus. Based on the distribution and characteristic of granitic rock, we considered it as granitic stone eggs, including buried stone eggs and exposed stone eggs. The wide distribution of stone eggs suggests that the granite landform evolution is at the stage of late juvenile to youth. The formation mechanism is closely related to the geological tectonic movement and hot-humid climate conditions within the areas. The exposed stone eggs mainly attribute to the exposure of buried stone egg, and spherical weathering of granite stone and talus, the stone eggs in the valley mainly derive from the combined interaction results of disintegration of exposed granite rock, outcropping of buried stone egg after soil collapse, flood carrying, seasonal freezing and thawing, as well as their rolling movement along the slope. The buried stone eggs mainly attribute to the differential weathering at different depth within the granite by temperature and precipitation, under the control of the inner fracture and joint of the granite.

Keywords: Meiling Mountain; exposed stone eggs; buried stone eggs; distribution and morphological characteristics; formation mechanism

Acknowledgements: This study was financially supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41571007), Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province (No. DLLJ201511), Center of Geological Resource Economics and Management Research (No. 14JC01), and The Construction of Practice base of Geological Disasters in Meiling.

First author: LI Zhiwen, male, Doctor, born in 1982, lecturer, mainly engaged in geomorphology and quaternary geology. Address: No. 418, Guanglan Avenue, Changbei Economic and Technological Development Zone, Nanchang, 330013. Email: lizw1982@163.com

Manuscript received on: 2016-08-18; Accepted on: 2017-07-10; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.05.011