

中国东部黄山的成山过程及其构造意义

罗照华, 李德东, 潘颖, 黄丹峰, 梁涛

中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

Luo Zhaohua, Li Dedong, Pan Ying, Huang Danfeng, Liang Tao

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Luo Zhaohua, Li Dedong, Pan Ying, et al. The mountain-building process of the Huangshan Mountain, East China, and its tectonic implications. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 250-260

Abstract: Whether there was a glacier on the Huangshan Hill is a topic long in debate and the opponents take an advantageous position. One of the interpretations from the opponents is that the previous elevation of the Huangshan Hill can not satisfy the condition of the hill being covered with snow all the year round. Such view point is from the interpretation of geographers for the mountain-building process of the Huangshan Hill without considering the information from the Huangshan massif and regional geology. The Huangshan massif is a small Early Cretaceous composite batholith mainly consisting of four intrusive units as the following in order from central to rim and from early to late: Wenquan unit (fine granular Bi-montzogranite), Yungusi unit (coarse and continuously heterogranular Bi-syenogranite), Shiziling unit (porphyritic Bi-syenogranite) and Gongyangshan unit (fine granular alkali feldspar granite with biotite). Such textural variation suggests that the Huangshan Hill has undergone syn-emplacement erosion, that the depth of magma emplacement decreased from early to late and that the emplacement process was driven by the tectonic pressing. Accordingly, the K-feldspar phenocrysts of the Shizifeng unit are oriented in the same direction and the primary joints in the Yungusi unit are perpendicular to the contact interfaces with both neighbor units. Both above facts suggest forceful emplacement of the Huangshan granites. Therefore, the Huangshan massif was produced in compressing condition instead of stretching environment as interpreted by the previous authors. The new interpretation is in accordance with the analysis of sedimentary basins and regional structure deformations and indicates that the Huangshan was in orogenic condition and had thick crust. Comparing the magma-originated depth and the recent crust thickness, it is reasonable to interpret that the crust of the Huangshan district has been thinned about 14-29 km since the late Cretaceous. Its geomorphic response is about 1.94-4.18 km. Accordingly, the elevation of the Huangshan at the late Cretaceous may have reached up to 2693-4776 m. Therefore, the Huangshan Hill is formed by differential erosion during the surface subsidence instead of by episodic rising.

Key words: granite; the Huangshan Hill; landscape; landforms; glacier; lithospheric thinning

摘要: 黄山是否存在过冰川是长期争议的科学问题,反对者的证据之一是黄山的海拔高度不能满足终年积雪的要求。这种认识源于地理学家对黄山成山过程的推测,没有考虑黄山岩体和区域地质演化所反映的成因信息。黄山岩体为一个主要由4个岩性单元组成的早白垩世复式小岩基,从早到晚、由边缘到中心依次为温

收稿日期:2009-04-16;修回日期:2009-05-15

基金项目:国家自然科学基金项目(40434010,90814007)

作者简介:罗照华(1956—),男,教授,博士生导师,矿物学、岩石学、矿床学专业,火成岩岩石学、岩浆活动与成矿作用、区域岩石大地构造研究方向。E-mail: luozh@cugb.edu.cn

泉细粒黑云母二长花岗岩、云谷寺连续不等粒粗粒黑云母正长花岗岩、狮子岭斑状黑云母正长花岗岩和贡阳山细粒黑云母碱长花岗岩组成。这种结构变化表明黄山地区发生过同侵位剥蚀作用,暗示岩浆侵位深度越来越小,受挤压构造力的驱动。与此相应,狮子岭单元的钾长石斑晶定向排列和云谷寺单元中的原生节理垂直于相邻两单元的接触界面,暗示黄山花岗岩具有强力侵位的特点。因此,黄山岩体形成于挤压构造环境,而不是前人推测的伸展环境。这种认识与区域构造变形和盆地分析的证据一致,暗示黄山地区曾经处于挤压造山环境,具有造山带型厚陆壳。对比岩浆起源深度和现今地壳厚度,可以合理地推测,晚白垩世以来黄山地区地壳减薄了约14~29 km,其地貌响应约为1.94~4.18 km。据此,黄山在早白垩世的海拔高度可能达到2 693~4 776 m。因此,黄山形成于地壳沉降过程中的差异侵蚀,而不是地壳的阶段式隆升。

关键词:花岗岩;黄山;风景;地貌;冰川;岩石圈减薄

中图分类号:P54 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2009)03-0250-11

黄山不仅是中国的十大名山之一,也是主要以花岗岩地貌为基础构成的风景区,被认为是地壳长期缓慢隆升和剥蚀作用的结果^[1-2]。有关黄山地貌景观的最大争议在于曾经是否存在冰川,从发表文章数量上看反对者目前占有明显的优势。反对者的重要证据之一是推测的雪线高度和古气候条件不能满足形成冰川的要求^[3]。值得注意的是,有关雪线高度的推测是建立在抬升成山的认识基础上,即认为黄山是从海平面高度逐渐抬升形成的^[2-3]。

这种认识与中国东部中生代以来岩石圈减薄的总趋势相矛盾。众所周知,地貌的形成与演化是地球内、外动力学系统相互作用的结果,与地壳厚度的时空变化密切相关,后者主要取决于岩石圈-软流圈的相互作用。因此,地貌既是地球表层对岩石圈-软流圈系统相互作用的响应,也是追索这种深部过程的重要证据。反过来,正确认识区域岩石圈演化也可以约束地貌的形成机制和演变过程。

大陆地壳与大洋地壳最显著的区别是陆壳中含有巨量的花岗质岩石,后者的低密度导致陆壳很难再循环进入地幔,是大陆生长的重要记录。在挤压环境中,深部能量和物质的注入将导致陆壳的增厚形成山脉;在伸展环境中,陆壳发生“香肠化”和沉降,形成特征的盆岭省甚至洋盆。中国东部中生代以来岩石圈遭受了重大改造,并伴随着相应的浅部响应,其表现主要为岩石圈厚度的减薄和盆岭省的形成^[4]。岩石圈减薄的基础或者为克拉通型岩石圈^[5],或者为造山带型岩石圈^[6]。根据重力均衡代偿原理^[7],这种减薄过程暗示了地表的沉降而不是抬升。因此,黄山有可能是在地壳沉降过程中形成的。另一方面,中国东部也是花岗岩地貌广泛发育的地区,近年来以花岗岩分布区为基础建立了众多的地质公园和地质遗迹保护区。然而,花岗岩地质学和岩石学特征对地貌成因的贡献阐述不足,通常

将花岗岩地貌成因的动力学条件简单地理解为地壳的隆升或山脉隆升而盆地下沉。但是,这种隆升可能是绝对隆升,也可能是相对隆升。对于雪线高度这样的问题,显然需要阐明黄山的绝对高度变化。因此,正确理解黄山岩体的岩浆定位机制及其对地貌成因的可能贡献具有重要意义。本文初步阐述了黄山花岗岩的地质特征和岩石学特征,结合区域地质演化探讨了黄山花岗岩形成的构造背景,以期黄山地貌景观的形成演化研究提供某些启示。

1 区域地质背景

黄山地区位于安徽省东南部,构造上属于扬子板块,传统上为江南古陆与皖南台褶带的结合部。近十几年来,对江南古陆的认识发生了重大变化,认为是一个弧-陆碰撞造山带,由钙碱性火山岩、复理石浊积岩、扬子大陆板块前震旦纪基底和构造混杂岩组成^[8]。江南造山带在中生代时期再次活化造山,形成一系列近东西向、向北逆冲的逆冲-推覆构造,使基底岩系相互叠置、强烈隆升^[9]。因此,按板块构造划分方案,黄山地区位于皖南台褶带内,紧邻江南板内造山带。皖浙赣断裂带从研究区东南部通过(图1a),控制了侏罗-白垩纪红色盆地及燕山期岩浆岩的形成和分布,是一条具有控矿作用的重要构造岩浆岩带^[10]。

黄山地区保留的地层记录主要是古生界和新元古界,祁门、休宁、绩溪以南部分地区分布有中生代小型山间盆地^[11]。根据余心起等^[11],早侏罗世月潭组属于山间盆地含煤建造;中侏罗世洪琴组以紫红、灰黄色中细粒砂岩为主,普遍超覆在不同的基底岩系之上,为内陆河湖相红色建造;晚侏罗世一早白垩世石岭组及清凉峰一带的黄尖组为山间盆地火山-碎屑岩建造,下伏为炳丘组及劳村组河床相砾

岩,上覆岩塘组厚度不足 100 m,是深湖相细碎屑-钙泥质沉积,富含生物化石,归属山间盆地暗色岩建造;跨越中、晚白垩世的徽州组下段以砾岩、岩屑砂岩、钙质结核泥岩为主,上段下部大多为细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩韵律互层,上部为岩屑砂岩与粉砂质泥岩韵律互层。到白垩纪末,形成了一个由类磨拉石建造→红色建造→类磨拉石建造的不完整序列,叠加在侏罗纪的沉积序列之上。由此,黄山地区晚中生代经历了一个完整的板内造山旋回,白垩纪末期发生了地壳的强烈隆升。

黄山地区分布有众多的深成岩体,沿皖浙赣断裂带形成了一个皖东南侵入岩的集中分布区(图 1a)。深成岩主要形成于晚侏罗世—早白垩世,如黄山岩体(124~135 Ma)、太平岩体(137 Ma)、九华山岩体(137 Ma)、伏岭岩体(120 Ma)、旌德岩体(139~148 Ma),与区内地层中唯一火山-碎屑岩建造黄尖组相对应。这表明,黄山地区晚中生代岩浆活动以深成侵入活动为主,是区域岩石圈结构遭受强烈改造的标志。区内岩体形态多为椭圆形,长轴方向总体为北东向,构成复式岩基或岩株。黄山岩体位于皖浙赣断裂带西北,大致处于皖东南侵入岩集中区的中心位置。

2 黄山岩体的地质特征

黄山岩体北与太平岩体(246.55 km²)侵入接触,东、南侵入于早古生代和新元古代地层中,岩体与围岩的接触界面外倾。围岩地层发生强烈褶皱和蚀变,太平岩体中发育一系列与黄山岩体接触边界大致垂直的岩脉,包括一条辉绿岩脉(图 1b)。黄山岩体出露的平面形态为略向北东约 50°方向延长的椭圆形,长轴约 15 km,短轴约 10 km,出露面积约 107.81 km²。根据深成岩三维形态的幂律公式 $T = 0.6(\pm 0.15)L^{0.6(\pm 0.10)}$ [12],岩体厚度约为 3.05 km。现今黄山岩体的最高峰为莲花峰(海拔 1 860 m),按此计算,黄山岩体尚有约 1 km 位于海平面高度以下。

初步野外观察表明,黄山岩体可以划分出 5 个结构单元,从老至新依次为温泉细粒黑云母二长花岗岩单元、云谷寺粗粒黑云母正长花岗岩((131±5) Ma)、狮子峰斑状黑云母正长花岗岩((128±5) Ma)、贡阳山细粒黑云母正长花岗岩((124±5) Ma)和脉岩单元(图 1b)。温泉单元位于黄山岩体

的南北两侧,云谷寺单元是黄山花岗岩的主体,狮子峰单元构成黄山岩体的内核,而贡阳山单元则呈散布状侵入于云谷寺单元和狮子峰单元中。这种套叠式结构特征一般用气球热膨胀侵位模型来解释[13],表明后续单元侵位过程中其前导性单元尚未完全固结[14],岩浆活动的持续时间不会很长。因此,黄山岩体不应当认为是四期岩浆活动的产物[15],而是同一期四次脉动式岩浆侵位的结果,此后尚有一次脉岩岩浆活动。

黄山岩体发育多组构造裂隙,其走向分别为近南北向、21°、60°和近东西向[2],主要为北东、北西和近南北向三组(图 1b)。汤口断层和逍遥溪断层是本区最主要的断裂,其中汤口断层为倾向南东的逆冲断层,倾角 60°左右。逍遥溪断层及与其大致平行的北西向断层为正断层,以光明顶一带为中心,东北部的北西向断层向北东倾,西南部的断层向南西倾。这种断层空间配置方式可以与岩浆体的收缩联系在一起。区内近南北向节理发育,其端部常见马尾状裂隙,可能与岩浆侵位过程有关。这样的裂隙分布与岩体形态特征一起暗示岩浆侵位过程中区域构造应力场的主压应力方向为北西向或近南北向,并叠加了岩浆侵位的局部应力场。

3 岩石学特征及其地貌贡献

除了岩脉之外,黄山岩体的四个侵入单元之间也具有明显的岩性区别。同一单元内部总体上岩性是均一的,可以有一定的变化。

温泉单元为细粒黑云母二长花岗岩。岩石呈灰白色,细粒结构,块状构造,主要由石英、斜长石、碱性长石组成,黑云母含量大于 5%,有时可达到 10%(图 2a)。岩石侵入于前寒武纪地层中,有脉体自岩体中伸出切割围岩,明显为侵入接触关系。该单元的岩石分布在黄山岩体的外侧,出露面积有限,对黄山地貌的形成贡献甚微。

云谷寺单元为粗粒黑云母正长花岗岩。岩石呈肉红色,粗粒结构-粗粒连续不等粒结构,主要组成矿物为石英和钾长石,斜长石和黑云母含量较少(图 2b)。岩石中偶尔可见暗色微粒包体,其总成分相当于安山岩或英安岩,常含有钾长石捕虏晶(图 2c),是岩浆混合作用的标志,表明黄山花岗岩的形成有幔源岩浆的贡献。云谷寺单元岩石结构具有一定的变化,可以划分出内外两个岩相带,其中外带与

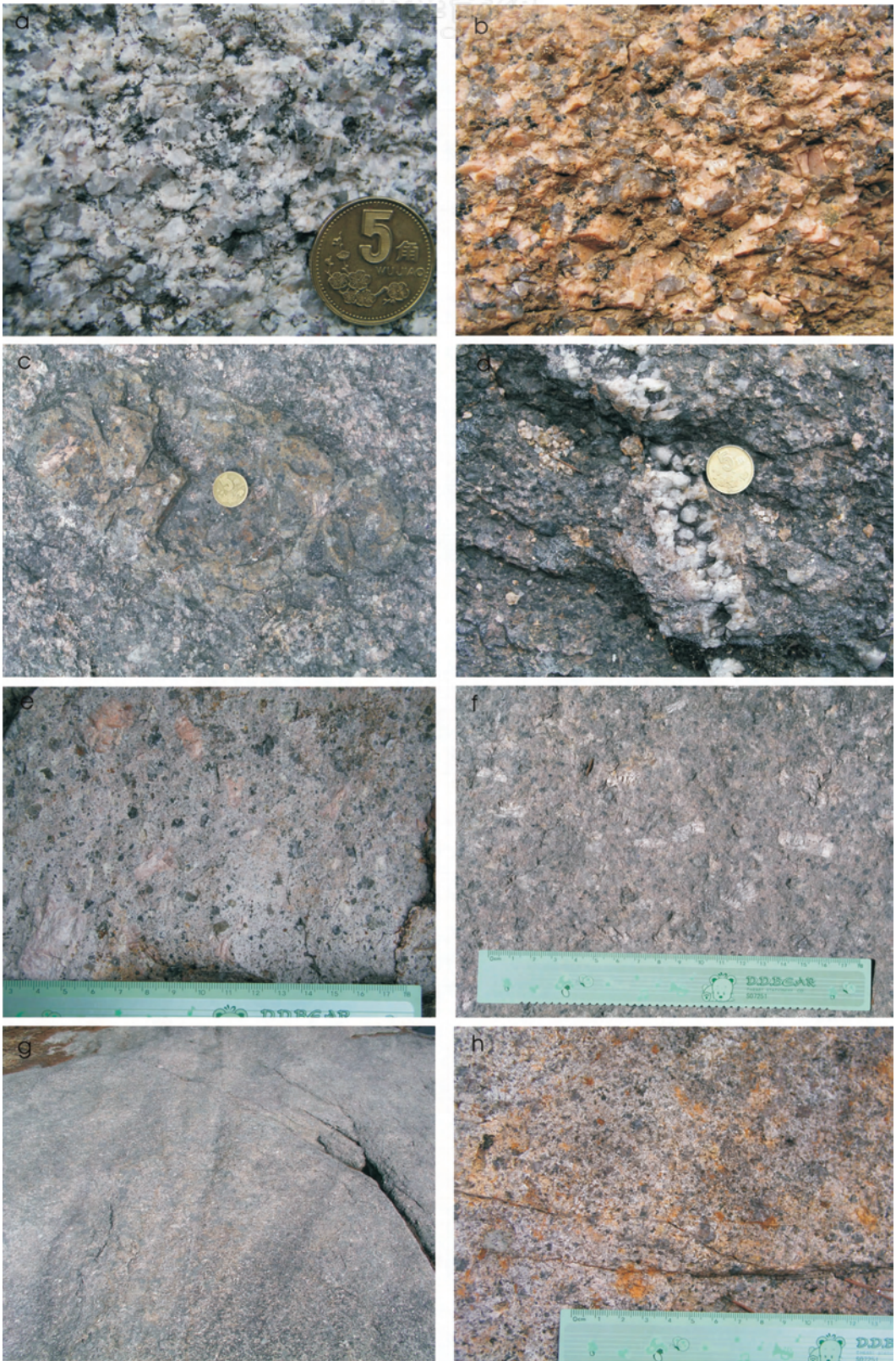


图2 黄山花岗岩的基本特征

Fig. 2 Basic characteristics of the Huangshan granites

a—温泉细粒黑云母二长花岗岩单元;b—云谷寺粗粒黑云母正长花岗岩单元;c—云谷寺单元中的暗色微粒包体;d—云谷寺单元中的沿近南北向张性裂隙充填的石英脉;e—狮子峰斑状黑云母正长花岗岩单元;f—狮子峰单元的定向组构;g—狮子峰单元中的构造裂隙;h—贡阳山细粒黑云母正长花岗岩单元。硬币直径约为 20.5 mm

岩矿物为钾长石和石英,其次为黑云母,很少见到斜长石(图 2e)。狮子峰单元位于黄山岩体的核心部位,其边部常常显示钾长石斑晶的定向构造,长轴方向平面上为近东西向(图 2f),剖面上近于直立。这表明,狮子峰单元是在区域挤压应力场中侵位的,不仅其自身的形态受到该应力场的影响,其内部钾长石斑晶的定向也与区域应力场一致。结合云谷寺单元中的石英脉和裂隙发育情况,可以认为狮子峰单元也是主动侵位的。

钾长石斑晶和圆粒状石英的大量出现表明岩浆在地壳深处已经开始结晶,在那个深度上岩浆应当投影在 Q-Ab-Or 相图的同结线上。基质矿物是较快速冷却的产物,大致位于低压条件下 Q-Ab-Or 相图的共结点上。因此,狮子峰单元的结构特征表明岩浆的固结过程可以划分为明显不同的两个阶段,斑晶形成于地壳深处,而基质则是在岩浆侵位以后结晶形成的。由于狮子峰单元的化学组成与云谷寺单元相近^[15],狮子峰单元的加速侵位可以理解为区域挤压应力场的突然加强,同样说明黄山岩体形成于挤压环境中。

狮子峰单元的快速侵位特征和晶洞构造暗示岩浆侵位以后含有较多的流体,因而在岩浆固结过程中其体积变化明显大于云谷寺单元。由此,狮子峰单元固结过程中将产生更多的原生节理,这可能是狮子峰单元具有较强成景能力的原因。黄山公园的奇峰异貌大多与狮子峰单元有关,一方面是因为其原生节理较发育,另一方面也可能是由于其岩性较均匀。节理的形成成为地表流水的选择性风化创造了条件,加之狮子峰单元的侵位水平高于云谷寺单元,更有利于流水的深切作用。此外,狮子峰单元中常常可见短小的构造裂隙,其端部具有马尾状分支的特点(图 2g)。这种裂隙不应当是区域构造剪切的直接结果,可能是岩浆固结过程中差异应力的产物。如果这种解释是正确的,意味着狮子峰单元剥蚀不深,其现今出露的岩石接近于黄山岩体的原始顶部。

贡阳山单元为细粒黑云母正长花岗岩。岩石呈肉红色,细粒结构-细粒含斑结构,主要由碱性长石和石英构成,少量的斜长石,黑云母微量(图 2h)。该单元散布在黄山岩体中,主要呈脉状产出,在岩体的不同部位有不同的形态。贡阳山单元具有极为发育的板状原生节理,可能与岩浆侵位较浅和体积较小有关。

4 讨论与结论

综上所述,黄山花岗岩的成景主要与云谷寺单元和狮子峰单元有关,所谓“前山雄伟、后山秀丽”,除了气候条件之外,很大程度上取决于这两个单元的地质学和岩石学特征。上述内容暗示黄山花岗岩是岩浆底辟气球热膨胀侵位机制的产物,岩体的三维几何形态为中心向上突起的厚板状,其厚度约为 3 km,最大厚度不超过 5 km。但是,有关黄山花岗岩形成的构造背景及其与地貌景观关系的认识还存在争议。

4.1 黄山岩体成因的构造背景

火成岩与构造背景的关系历来受到地质学家的重视,因为岩浆活动常常具有事件性的特点且容易获得高精度测年结果,也因为岩浆的起源与演化直接与区域构造过程有关。但是,如何正确识别火成岩形成的构造背景却是一个长期没有得到解决的科学问题,岩石学家倾向于利用火成岩组合来判别构造环境^[16],而地球化学家则多利用元素统计特征进行构造背景分类^[17],或者综合岩石学、矿物学和地球化学特征识别火成岩形成的构造背景^[18-19]。不管是哪一种判别方法,其最基本的识别途径都是基于“将今论古”的原则,即将所研究火成岩与现今典型构造分区的火成岩进行对比,因而首要任务是阐明火成岩的基本特征和成因信息。

张舒等详细研究了黄山花岗岩的地球化学特征,认为黄山花岗岩属于 A₂ 型花岗岩,形成于拉张的构造背景^[15]。姜耀辉等也持有类似的观点,但将相邻的太平岩体归属为 I 型花岗岩类^[20]。这似乎证实了 A₂ 型花岗岩常与 I 型花岗岩类共生的观点,因而黄山岩体被认为形成于造山晚期或造山后的伸展环境。这些认识主要基于元素判别图解,其潜在的前提是每一种岩石都形成于特定的构造环境中,且与相邻岩石类型在地球化学特征上是可分的。但是,火成岩成分与构造环境有关主要是因为不同构造环境具有不同的岩石圈-软流圈结构和构造热体制,严格来说,单独一种岩石不具有判别构造背景的意义。在相似的构造热体制下,具有类似岩石圈-软流圈结构的地区应当产生类似的火成岩组合。因此,利用岩石组合来判别构造背景要更为合理^[16]。在黄山地区,除了黄山花岗岩之外,直接相邻的还有太平花岗闪长岩。由于二者形成时间相近,很难相

信它们是不同的构造背景下的产物。因此,将太平岩体归属为挤压环境而黄山岩体归属为拉张环境是值得商榷的。

此外,来自相邻学科的证据是不容忽视的。皖南的区域性伸展作用至多始于晚白垩世—古近纪,以出现大量陆相伸展盆地标志。在此之前的晚中生代时期,皖南主要处于板内挤压造山环境^[9]。一系列北东向到近东西向的逆冲断层的发育也支持挤压造山环境的观点,白垩纪盆地沉积中心向北迁移的特点^[11]也与黄山岩体的组构特征相吻合。因此,黄山岩体应当形成于造山晚期的挤压环境,而不是伸展环境,区域伸展作用应当发生在晚白垩世及其以后。

黄山岩体本身的地质特征从早到晚呈规律性变化也反映了挤压环境的特点。如前所述,温泉单元为细粒结构和小体积,云谷寺单元为粗粒结构和大体积,综合这两方面的证据,这两个单元应当侵位较深(7~8 km)^[15],且温泉单元侵位时围岩具有较低的温度(按 22 °C/km 计算,约为 150~180 °C)。由于前导性单元侵位对围岩的加热和云谷寺单元的巨大岩体体积,云谷寺单元岩浆可以在较缓慢冷却的条件下固结成岩。但是,云谷寺单元为连续不等粒结构,暗示岩浆固结过程中温度场是逐渐变化的,可能与地表剥蚀作用有关。特别是与狮子峰单元的结构特征综合考虑,可以看出黄山岩体的主体部分实际上是在地表强烈剥蚀过程中逐渐侵位的。如前所述,狮子峰单元具有明显的斑状结构,表明岩浆的两阶段结晶作用,其中基质的结晶环境应当具有较低的温度场。但是,云谷寺单元处于与狮子峰单元大致相同的深度位置,其大体积暗示围岩的温度不会太低。因此,狮子峰单元的低温结晶环境必然是地表剥蚀作用造成的,要求有一个同岩浆区域抬升的过程,因为狮子峰单元与云谷寺单元大致位于上地壳的同一部位。岩浆侵位的驱动力主要是岩浆浮力和构造附加力,由于两个单元的化学组成差别不大,狮子峰单元的快速侵位应当主要是构造挤压造成。据此可以得出结论,黄山岩体应当形成于区域挤压构造背景。

4.2 黄山冰川问题

黄山地貌成因最具争议的问题是该区是否存在过冰川。近 10 年来,非冰川论者明显占了上风。但是,它们提出的证据具有明显的多解性。例如,冰碛砾石的冰川印记有可能因后期的洪水冲刷而消失。

笔者注意到反对者的证据之一是黄山的海拔高度有限,因而不可能满足冰川产生的基本条件^[1]。但是,学者们对海拔高度的推测仅仅基于侵蚀面的分布,也可能具有多解性。由于笔者对冰川的认识有限,这里仅就岩石圈伸展过程中造成的可能地貌变化作一些讨论,供地理学家参考。

如前所述,黄山地区在晚白垩世及其以后进入区域伸展阶段。在岩石圈伸展过程中,不仅地壳,而且整个岩石圈的厚度都将发生减薄作用。根据重力均衡代偿原理,区域地形也应当发生相应的变化^[7]。因此,阐明地壳厚度变化也是论证冰川存在与否的方式之一。黄山地区现今地壳厚度约为 36 km(转引自[9]),小于全球大陆地壳平均厚度 41.1 km^[21],暗示黄山地区确实发生过地壳减薄和地面沉降。因此,有关黄山地区从海平面高度长期螺旋式抬升的论述^[3]是值得商榷的。

众所周知,花岗质岩石中的 Eu 异常可用来判断岩浆是否发生过斜长石的分离结晶作用或源区是否存在斜长石^[22-23]。黄山地区的 I 型花岗岩类具有平滑的稀土元素配分形式^[20],暗示岩浆起源较深(深于斜长石消失的位置),可能大于 50~65 km^[24]。A₂ 型花岗岩类的“海鸥式”稀土元素配分形式^[20]可以有两种解释,发生过斜长石分离结晶作用或岩浆起源于斜长石稳定区。分离结晶作用的前提是被分离矿物为近液相线矿物和其与残余熔浆的密度差足够大^[23]。根据前面的岩石学描述,黄山花岗岩含有大量的钾长石,其总成分在 Q-Ab-Or 相图中应当投于钾长石首晶区,不太可能发生斜长石的分离结晶作用。因此,黄山花岗岩应当起源于比相近时代 I 型花岗岩浅的地壳位置。这又有两种可能,一是岩浆起源于地壳底部,幔源玄武质岩浆的底侵作用(underplating)触发了下地壳的部分熔融;另一种解释是玄武质岩浆的内侵作用(intraplating)触发了花岗质岩石的产生。前一种解释暗示岩浆发生之前地壳已经遭受巨大减薄,因而在太平岩体(约 137 Ma)和黄山岩体(约 135 Ma)形成之间发生过一次重大的构造事件(如岩石圈拆沉作用),目前尚没有相关的地层学和构造学证据。后一种解释暗示晚侏罗世—早白垩世时期黄山地区存在多重岩浆房或 MASH 过程聚焦区^[25],区域岩石圈和地壳减薄事件发生在黄山岩体形成之后,这与黄山岩体的地质学和岩石学一致。基于黄山花岗岩形成于挤压构造背景的认识,笔者倾向于后一种解释。但是,无论哪

一种解释,都必须符合黄山岩体形成之后地壳发生了减薄的认识。这种减薄作用是岩石圈伸展的结果,在 15 km 深度左右存在低速高导层(转引自[9])是一个有力的证据,如果将其理解为圈层拆离带^[26]的话。

假设黄山岩体形成时地壳的厚度为 50~65 km 左右,则从那以后地壳至少减薄了 14~29 km。根据华南地区地壳厚度(y)和地形高度(x)的关系式 $y = 7.2x + 32$ ^[7],如果当时达到重力均衡,其地形高度约等于 1 944~4 028 m,比现今的计算平均高度 556 m 高出 1 389~3 472 m。由于挤压造山阶段构造附加力的影响,造山过程中不可能达到重力均衡。特别是考虑到岩浆侵位的影响,地形高度将会出现更大的变化。例如,青藏高原的平均地壳厚度约为 70 km,按此公式计算,其地形高度为 5 280 m,大致相当于平均高原面的海拔高度。但是,高原地区的山系明显高于这个高度,如喜马拉雅山脉。据此,黄山在早白垩世时期的高度有可能达到 2 693~4 776 m 或更高,而不是地理学家推测的海平面高度。因此,黄山的产生有可能源自地面沉降而不是抬升。假定黄山地区的地壳减薄过程始于 100 Ma 且为均匀减薄,则地壳减薄的速率为 0.14~0.29 mm/a,其地貌响应为 0.013~0.034 mm/a。由于地壳厚度及其导致的地貌变化具有阶段性的特点,地面的沉降有可能在某些时期停止,甚至略有抬升。锆石和磷灰石裂变径迹研究表明,年龄较大的样品剥露速率较小,而年龄较小的样品剥露速率较大^①。因此,黄山岩体有可能在晚近地质时期具有更大的剥露速率。假设更新世(2.6 Ma)以来黄山地区的地面沉降速率是 1 mm/a,其沉降幅度可达 2 600 m,加上现今莲花峰的高程 1 860 m,完全有可能达到形成冰川的要求。

另一方面,对比中国东部和西部的地貌特征可以发现,西部造山带的强烈隆升造就了大量前进发育的冲积扇(图 3a),与东部地区明显不同(图 3b)。另一个很有意义的现象是尖峰地貌一般出现在高山之巅,因为那里不发育地表径流的侧蚀作用。将尖峰地貌与冲积扇综合起来考虑,可以断定中国西部的确正在发生造山抬升。相反,在东部地区,尖峰地貌常常出现在低海拔位置,有些尖峰地貌甚至出现在平原地区(如河南镇平嵯峨山)。与此相应,东部地区处处可见巨厚的花岗岩风化壳(如大别山的商城岩体和天津蓟县的盘山岩体),后者是没有地表冲

刷的证据,因而也是地面沉降的证据(图 3c)。黄山山麓也可以见到类似的风化壳(图 3d),支持地面沉降的解释。

地理学家可能很少注意到,不同时代的侵入岩在某些地区产出于不同的水平高度,而在另一些地区则产出于大致相同的水平高度。例如,大别山被认为是印支期碰撞造山带,以广泛出露高压-超高压变质岩为特征,却没有发现同时代的花岗质岩基,可能与强烈的地表剥蚀作用有关。相反,鲁西地区不仅发育有太古宙深变质岩系,也产有古生代的金伯利岩以及中生代的深成侵入岩。太古宙深变质岩系常常被认为是下地壳的组成部分,深成侵入岩一般侵位于中上地壳,而金伯利岩爆破角砾岩筒则应当是超浅成岩浆活动的产物。这些本应当产出于不同深度水平上的岩石如今都出现在大致相同的海拔高度,有可能是地壳周期性抬升和沉降的有利证据。

据此,作者不能同意关于黄山地区不断抬升成山的观点。地理学家关于地壳抬升的主要依据之一是阶地的形成机制,似乎很好地解释了为什么老阶地高于新阶地以及区域夷平面的形成过程(图 4a)。但是,阶地和夷平面的产生只能说明山脉与相邻地区的相对高差,并不能直接对应于地壳的抬升。图 4a 是经典的抬升模式,随着地面的抬升和切割,可以形成多级阶地和夷平面。但是,这样的地貌也可以在地壳沉降的过程中产生(图 4b),甚至在山脉形成过程中已经产生(图 4c)。例如,现今的青藏高原,其主体部分并没有遭受强烈的侵蚀切割,平均海拔保持在 5 000 m 左右,其主要原因可能是周边山系阻隔作用和雨水的贫乏(图 4b, A)。如果造山带发生垮塌,高原将会因重力均衡而降低地表高度(图 4b, B),降雨量也会更充沛一些,因而其边部首先受到侵蚀,剥蚀产物被搬运到远处,而高原内部的剥蚀产物则部分堆积在边部。理论上,高原核部的汇水面积小于边部,高原面(夷平面)容易被保留下来(一级夷平面)。此后,高原继续下沉,由于其边部与相邻地区依然保持较高的高差,可以继续被侵蚀,高原内部搬运过来剥蚀产物也会继续在这些部位堆积(图 4b, C),形成二级夷平面。如此反复进行,区域海拔高度越来越低,越难于遭受剥蚀,形成平原或准

① 袁万明. 黄山岩体形成时代与隆升剥露. 陈安泽,程世威编. 黄山花岗岩地质地貌. 安徽黄山: 黄山风景区管委会, 2009: 104-117.

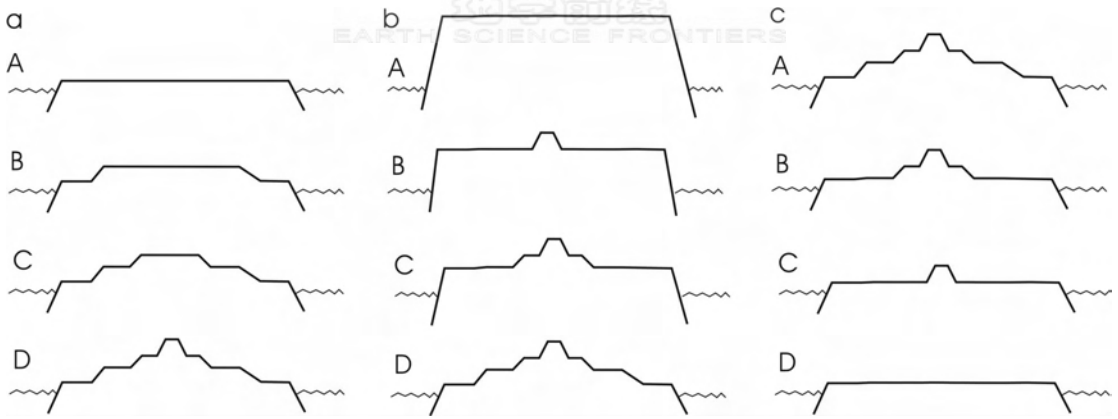


图4 现今地貌的3种可能形成过程

Fig. 4 Three alternative models for relief production

a—区域隆升与地貌的成型;b—区域沉陷与地貌成型;c—区域沉陷与地貌的保存

平原(图4b, D)。当这些地区仍保留有孤山时,由于汇水面积的有限性,这些孤山将可以长期保留。黄山地区的情况可能与其类似,中生代时期北有大别-苏鲁造山带,南有江南造山带。如今,这些造山带都缺少高耸地貌,表明发生了造山带垮塌和地壳的减薄,是低位阶地产生的动力学原因。

如果这种推测是正确的,有关黄山的演化史就应当重新认识,希望能够引起地理学家的重视。

5 结论

结合前人的研究成果和实际观察,初步分析表明,黄山的形成演化及其与成景的关系尚缺乏系统的研究,不同学者对科学证据的解释相互矛盾,有必要重新厘定,建立一个内、外动力学一致的整合模型。

(1)花岗岩地质学和岩石学特征反映的局部应力场与地层学和构造学揭示的区域应力场一致,表明黄山花岗岩形成于挤压造山环境,而不是伸展环境。黄山花岗岩具有 A_2 型花岗岩的特征是因为岩浆起源于幔源岩浆的内侵作用,而不是由于岩石圈减薄导致的深部热流上升。因此,晚中生代时期黄山地区应当具有造山带的地壳厚度和地貌特征。

(2)黄山地区中生代以来发生了地壳的大规模减薄,减薄幅度大致为 14~29 km。与此相应,其地表高度逐渐下降到现今的水平。由此,黄山地貌是在地表逐渐沉陷的过程中产生的,而不是抬升。

(3)不同岩浆单元侵位在相同的地壳层位,但其侵位深度却越来越小,表明黄山地区存在同岩浆(造

山)剥蚀作用。

(4)黄山风景区的地貌成景不仅与表生作用有关,也与岩浆侵位机制和花岗岩岩性特征紧密相关,狮子峰单元的浅侵位特点有利于原生节理的发育,为表生作用塑造秀丽的地貌景观创造了条件。

(5)黄山在第四纪时期是否存在过冰川尚不能得出否定的结论,现有的反对证据存在多解性。长期以来,地理学家常常将相对升降演绎为绝对升降。本例表明,中国东部与西部的地貌成因和演化可能存在质的不同,需要引起重视。另一方面,地球化学家常常用 A 型花岗岩作为伸展构造环境的判别标志,这与黄山花岗岩的岩石学标志、岩体地质特征和区域构造演化相矛盾。看来, A 型花岗岩的构造意义仍需要进一步进行研究。

感谢陈安泽先生和汪诚提供了考察黄山的机会。崔之久先生对本文的成文起了重要作用,他对不同观点的态度令人敬佩,在此表示由衷的谢意。感谢评审员提出了宝贵意见,对于改善本文的质量有帮助。

References:

- [1] Huang P H, Diffendal R F Jr, Yang M Q, et al. Mountain evolution and environmental changes of Huangshan, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(5): 401-408 (in Chinese).
- [2] Zhang L H. Survey of research into Mt. Huangshan geography [J]. *Journal of Suzhou Teachers College*, 2003, 18(4): 68-71, 82 (in Chinese).
- [3] Huang P H. Evolutional process of geomorphology at Mt. Huangshan [J]. *Journal of China University of Science and*

- Technology, 1995, 25 (2): 160-165(in Chinese).
- [4] Deng J F. Magmatism and deep processes of continental rifting[M]//Chi J S. The Study of Cenozoic Basalts and Upper Mantle Beneath Eastern China (Attachment: Kimberlites). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988: 201-218 (in Chinese).
- [5] Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China[M]//Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, et al. Magmatic Processes and Plate Tectonics[C]. Geological Society Special Publication, 1993, 76: 71-81.
- [6] Luo Z H, Wei Y, Xin H T, et al. The Mesozoic intraplate orogeny of the Taihang Mountains and great thinning of the continental lithosphere in the Northern China[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 52-63(in Chinese).
- [7] Teng J W. Introduction to Solid Geophysics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 896(in Chinese).
- [8] Chen G B, Xu S T, Shi Y H. New concepts of the important fundamental problems in the Southern Anhui[J]. Geology of Anhui, 1998, 8(4): 49-53 (in Chinese).
- [9] Zhu G, Liu G S. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jiangnan intracontinental orogenic belt in Southern Anhui[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24 (2): 103-111(in Chinese).
- [10] Yu X Q, Jiang L L, Xu W, et al. Identification and basic characteristics of the Anhui-Zhejiang-Jiangxi fault zone[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 102-113(in Chinese).
- [11] Yu X Q, Wang D E. Jurassic-Cretaceous sequence stratigraphy of Huangshan area in South Anhui [J]. Geoscience, 2001, 15(1): 27-34(in Chinese).
- [12] Cruden A R, McCaffrey K J W. Growth of plutons by floor subsidence; Implications for rates of emplacement, intrusion spacing and melt-extraction mechanism [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A, Solid Earth and Geodesy, 2001, 26: 303-318.
- [13] Ma C Q, Wang R J, Qiu J X. Enclaves as indicator of the origin of granitoid magma and repeater magma mingling; An example from the Zhoukoudian intrusion, Beijing[J]. Geological Review, 1992, 38(2):109-119 (in Chinese).
- [14] Brown M, Rushmer T. Evolution and differentiation of the continental crust[M]//Brown M, Rushmer T. Evolution and Differentiation of the Continental Crust. Cambridge: Cambridge University Press, 2006:1-20.
- [15] Zhang S, Zhang Z C, Ai Y, et al. The petrology, mineralogy and geochemistry study of the Huangshan granite intrusion in Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(1): 25-38(in Chinese).
- [16] Deng J F, Xiao Q H, Su S G, et al. Igneous petrotectonic assemblages and tectonic settings; A discussion[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(3): 392-402(in Chinese).
- [17] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granite rocks[J]. J Petrol, 1984, 25: 956-983.
- [18] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bull, 1989, 101: 635-643.
- [19] Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46: 605-625.
- [20] Jiang Y H, Qi J Z, Liu H Y, et al. A₂-type granite in neighbouring area of Zhejiang-Jiangxi-Anhui Provinces [J]. Volcanology and Mineral Resources, 1999, 20(1): 48-55(in Chinese).
- [21] Christensen N I, Mooney W D. Seismic velocity structure and composition of the continental crust; A global view[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100 (B7): 9761-9788.
- [22] Luo Z H, Deng J F, Han X Q. On Characteristics of Magmatic Activities and Orogenic Process of Taihangshan Intraplate Orogen [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 124 (in Chinese).
- [23] Luo Z H, Huang Z M, Ke S. An overview of granitoid[J]. Geological Review, 2007, 53(Suppl): 180-226 (in Chinese).
- [24] Deng J F, Su S G, Niu Y L, et al. A possible model for the lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism [J]. Lithos, 2007, 96: 22-35.
- [25] Hildreth W. Quaternary Magmatism in the Cascades; Geological Perspectives[M]. USGS Professional Paper, 2007, 1744: 1-125.
- [26] Wan T F, Wang Y M, Liu J L. Detachments and magmatic source depth in lithosphere of Eastern China during Yanshanian and Sichuanian stages[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 1-35(in Chinese).

参考文献:

- [1] 黄培华, Diffenal R F Jr, 杨明钦, 等. 黄山山地演化与环境变迁[J]. 地理科学, 1998, 18(5): 401-408.
- [2] 张理华. 黄山地质研究综述[J]. 宿州师专学报, 2003, 18 (4): 68-71, 82.
- [3] 黄培华. 黄山山体的演化过程研究[J]. 中国科学技术大学学报, 1995, 25 (2): 160-165.
- [4] 邓晋福. 大陆裂谷岩浆作用及深部过程[M]//池际尚. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究. 武汉: 中国地质大学出版社

- 社, 1988: 201-218.
- [6] 罗照华,魏阳,辛厚田,等. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 52-63.
- [7] 滕吉文. 固体地球物理学概论[M]. 北京:地震出版社, 2003: 896.
- [8] 陈冠宝,徐树桐,石永红. 皖南地区若干重大基础地质问题新认识[J]. 安徽地质, 1998, 8(4): 49-53.
- [9] 朱光,刘国生. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 103-111.
- [10] 余心起,江来利,许卫,等. 皖浙赣断裂带的界定及其基本特征[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 102-113.
- [11] 余心起,王德恩. 安徽黄山地区侏罗纪-白垩纪层序地层学特征[J]. 现代地质, 2001, 15(1): 27-34.
- [12] 马昌前,王人镜,邱家骧. 花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志——包体,以北京周口店岩体为例[J]. 地质论评, 1992, 38(2): 109-118.
- [13] 张舒,张招崇,艾羽,等. 安徽黄山花岗岩岩石学、矿物学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(1): 25-38.
- [14] 邓晋福,肖庆辉,苏尚国,等. 火成岩组合与构造环境:讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 392-402.
- [15] 姜耀辉,戚建中,刘红樱,等. 浙赣皖相邻地区 A₂ 型花岗岩[J]. 火山地质与矿产, 1999, 20(1): 48-55.
- [16] 罗照华,邓晋福,韩秀卿. 太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演[M]. 北京:地质出版社, 1999: 1-124.
- [17] 罗照华,黄忠敏,柯珊. 花岗质岩石的基本问题[J]. 地质论评, 2007, 53(增刊):180-226.
- [18] 万天丰,王亚妹,刘俊来. 中国东部燕山期和四川期岩石圈构造滑脱与岩浆起源深度[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 1-35.

《地学前缘》荣获“2007年中国百种杰出学术期刊”及“中国精品科技期刊”称号

据 2008 年中国科学技术信息研究所统计结果,《地学前缘》总被引频次为 3023,影响因子为 2.306。

《地学前缘》一篇文章荣获“2007年中国百篇最具影响国内学术论文”称号

中国科学院地质与地球物理研究所吴福元研究员文章《中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题》(发表于《地学前缘》2003,10(3):51-60)