

中国花岗岩地貌的类型特征与演化

崔之久¹, 杨建强², 陈艺鑫¹

(1. 北京大学环境学院, 北京 100871; 2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要: 在中国南方亚热带季风气候条件下, 自中、上新世以来的夷平面及其深厚的花岗岩风化壳在后期不同程度构造抬升一下切过程中, 造成许多中国特有的花岗岩地貌类型, 如黄山和三清山等处的花岗岩峰林、石林、造型石、风动石等。本文讨论了中国花岗岩风化壳和地貌的时空演化规律, 提出地貌发育年代与中、上新世广布的夷平面的密切关系, 以及在不同抬升背景下, 花岗岩地貌与风化壳的关系。并可据此推算不同山地的抬升幅度, 沿海仅抬升约 200m, 向内地逐渐增大, 到南岭或大别山、伏牛山则达到约 1600~2000 m。

关键词: 中国; 花岗岩; 地貌; 夷平面; 气候; 构造运动

1 引言

花岗岩是地球上分布最广、最常见的火成岩, 占地表火成岩面积的 20%~25%。中国是世界上花岗岩分布最广的国家之一, 花岗岩面积 90.9 万 km², 约占全国面积的 10% 左右。花岗岩主要出露在中国东部, 特别集中在粤、闽、桂、赣、湘等省, 前二者花岗岩面积占全国的 30%~40%, 后三者占 10%~20%¹⁾。不同时代、成因、岩性的花岗岩在不同的气候带、不同海拔、不同外营力作用区形成了类型迥然的地貌形态。奇、险、秀、雄的花岗岩景观也已成为我国重要风景区的主导, 如被列为世界自然遗产的黄山、泰山以及著名的华山、三清山、九华山、天柱山等, 在中国共有 40 余处。国际上, 如美国加州的约瑟米蒂国家公园也是花岗岩地貌区²⁾。同时, 花岗岩是了解地表构造抬升、剥蚀过程的一把钥匙。因为花岗岩是深成侵入岩, 形成时距地表 5~30km 之间, 其出露历史就是地貌演化历史。如已知花岗岩的年代、侵入深度, 则可探讨其出露地表的年代、出露的地貌过程、剥蚀速率等地貌学问题, 当然也要联系到花岗岩的岩相、岩性、结构、构造等等³⁾。而地质学家更认为花岗岩是“人类了解地球深部信息的有效探针”, 是“研究壳—幔相互作用的突破口”⁴⁾。早在 1948, 前苏联地貌学家 K.K. 马尔科夫就研究了地貌过程中的岩浆运动^[1]。美国的吉尔伯特曾指出岩浆是一种活跃的原动力, 或导致地表水平运动, 或导致垂直运动。因为在所有褶皱区几乎都有花岗岩侵入体^[2]。褶皱—地壳破裂—岩浆入侵—地壳隆起是当时公认的模式。但也有人认为花岗岩上升时变热凝结成岩基, 而到达表层时则变冷收缩, 导致地表下降, 表现为褶皱带上的塌陷^[1]。我国地貌学家曾昭璇早在 1960 年就指出了花岗岩的风化特征及特有的风化块石, 被他命名为“石蛋”, 并已被广泛引用^[3]。本文在 2006 年第一届国际花岗岩地质地貌研讨会展示的国内外大量资料的基础上, 系统阐明中国花岗岩地貌的特点及其与夷平面发育和构造抬升的关系。

1) 王丽宁, 李江海. 我国东部典型花岗岩地貌景观形成机理. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 50-55.

2) Palmer, D.F. 约瑟米蒂国家公园. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流论文集—中国三清山, 2006, 121-135.

3) 罗照华, 黄忠敏, 柯珊. 花岗岩的基本知识. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 243-290.

4) 陈安泽. 花岗岩地貌景观若干问题讨论. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 3-9.

收稿日期: 2006-11-21; 修订日期: 2007-05-08

作者简介: 崔之久 (1933-), 男, 教授, 主要从事地貌学与第四纪地质学研究. E-mail: czj@urban.pku.edu.cn

2 中国花岗岩地貌地带性分区

花岗岩地貌随不同气候区有明显的地带性分异(图 1),特别是纬度地带性,如中国东南的湿热花岗岩石林、峰林地貌区(IV 区)是以化学风化为主,年平均温度在 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量约 $800\sim 2000\text{ mm}$,现存原始风化壳厚度多在 $30\sim 70\text{ m}$ 之间,个别达到了 100 m 。在后期降水冲刷、侵蚀和中度构造抬升的背景下,形成各种由原始风化壳被逐渐抬升、剥蚀、暴露而成的一系列地貌类型,如石蛋岛山、风动石、石蛋层以及石林、峰林等最具中国特色的花岗岩地貌。而秦岭—淮河以北,半干旱半湿润区(I 区)降水少,冬季长而干冷,盛行物理风化,大量花岗岩露头皆直接风化成砂粒而被风蚀和水蚀,宏观上多为浑圆、低缓丘陵,中、微观上则有大量风蚀地貌。特别是 I 区西部偏北地区(即内蒙古东南部)各种风蚀地貌琳琅满目,如赤峰巴林左旗、克什克腾旗等地风蚀柱、龛、穿洞、蘑菇以及被个别人说成的风蚀锅穴(有人称其为正规的地貌学辞典上查不到的“冰臼”)比比皆是。以上各类风蚀地貌均发育在高处的花岗岩体上,因为此处风力强盛,而在谷地中则不见。类似的情况可见于西北干旱花岗岩地貌区(II 区),只是气候过于干旱,并不有利于寒冻风化所需的时干、时湿、时热、时冷的高冻融频率要求。花岗岩山地多呈岩岗状,比 I 区的花岗岩丘陵显得高大、陡峻,同时在海拔高处有众多花岗岩质的冰缘岩柱,故中、微观地貌与 I 区颇为相似,但宏观地貌差别较大。至于 III 区,寒冻花岗岩高山区冰缘岩柱、岩岗最为多见,风蚀类型少见,形态类型比较单调。同时,若从 IV 区到 III 区作一由低海拔到高海拔的花岗岩地貌剖面,则足以显现,花岗岩地貌的垂直地带性特点,即以东部石林和峰林为代表的种类繁多的花岗岩地貌类型,经过云贵高原而上升到 3000 m 以上的青藏高原则变成以岩岗和冰缘岩柱为代表的十分单调的花岗岩地貌区。



图 1 中国花岗岩的气候地貌分区图

Fig. 1 The regional map of granite landforms in China

因为 III 区的高寒环境造成相对湿度较大, 风力也不强烈, 故一些很有特色的风蚀花岗岩地貌也无法出现。

必须特别提出的是, 我国花岗岩红色风化壳的主要形成期为中、上新世 (20 Ma~7 Ma) 之间^[4], 而此时亚热带北界可达大青山以南和辽东半岛南部, 这表明了气候地貌多代性特点, 作者就在大青山南坡见到很典型的保存很好的发育于亚热带的花岗岩风化壳, 中度风化带的碎石层和弱风化带的石蛋层保留很好。可以想象这种情况肯定会在现代 I 区的花岗岩地貌形成过程中发挥影响。

同样在中、上新世青藏高原未抬升前, 同一地区也应有当时的老风化壳保留, 但它们所起的作用则需要更细致的工作才会被揭示。

表 1 中国东部现代花岗岩风化壳厚度^[4]

Tab. 1 Present depth of the granite weathering crust in eastern China

地点	岩石类型	风化深度 (米)
河南南阳	花岗岩	20
黄陵背斜区	花岗岩	30
皖南黄山	花岗岩	10
湖南西南	花岗岩	20-30
江西平江中游	花岗岩	50-60
江西南部	花岗岩	60-70
赣南东部	黑云母花岗岩	40-50
广东九龙半岛	花岗岩	50
广东五华	粗粒花岗岩	>40
广东德庆	花岗岩	>20
广东陆丰	粗粒花岗岩	>80
福建安溪	粗粒花岗岩	40-70
广西桂东	花岗岩	30
广西南流河流域	花岗岩	20-30

3 风化壳—夷平面对花岗岩地貌发育的影响

3.1 花岗岩风化壳演化的一般规律

花岗岩在全球分布广泛, 其岩石性质也有差异。就花岗岩宏观地貌区域特征看, 气候地带性有导向作用。导致同为花岗岩, 在热带—亚热带和温带—寒带地区却有很不相同的地貌形态及演化过程, 尤其是风化过程。前者以化学风化为主, 后者以物理风化为主。前者深度的化学风化, 形成上部厚层风化壳体和较平坦的地表面 (表 1, 2, 图 2), 以及下部起伏不平的由新鲜岩层构成的风化前锋 (front of weathering), 从而构成“双面风化壳 (double surface weathering)”^[5,6]。地壳一旦抬升, 上层风化壳可以产生不同程度的剥蚀, 下层风化壳前锋也会有不同程度的暴露^[4]。于是, 各种奇形怪状的造型石 (学名“石蛋”)^[3]就成为花岗岩区的风景点。宏观的断裂构造控制着宏观的平面分布, 垂直、水平、斜交的三组节理控制着大量造型石的相对位置和具体形象, 也控制着该形象维持的时间长短。而构造运动抬升的程度则控制着各类造型石的宏观规模和现有海拔高度。如在中国东部低台阶上, 众多花岗岩体形成的地貌就有百米或千米以上的不同绝对高度和数十

表 2 花岗岩风化壳强度分层、特征及裂隙显示程度^[8]

Tab. 2 The stratification, features and fractural presentation of the granite weathering

花岗岩由上而下风化强度分带	可视节理表现	节理间距离 (米)* 钻孔 部分露头		风化带岩性特征描述
极强风化带 (completely weathered)	不见			已成为红土层, 岩石本身颜色没有显示, 结构全无显现, 各矿物颗粒完全分离
强风化带 (highly weathered)	不见或 隐约可见	0.12	0.20	已成为砂土层, 红黄色, 原始岩石结构大部分消失, 可以看到矿物颗粒的分离
中等风化带 (moderately weathered)	可见	0.12	0.16	为砂土砾石层, 本色; 原始岩石结构部分保存, 有脱离基岩的石蛋群, 有砂质充填石蛋之间; 细部可见矿物颗粒边界部分裂开
弱风化带 (slightly weathered)	明显	0.14	0.18	原始岩石结构部分保存, 红色风化壳根部深入裂隙, 分割基岩成石蛋层
新鲜基岩带 (fresh)	明显	0.25	0.26	无可视风化痕迹, 岩石新鲜, 晶体明亮

*节理间距离为三组节理的平均数, 分别以美国部分地区为例; 露头在风化带中仅见垂直节理为 0.22, 全样钻孔中为 0.24-0.25^[8]。

米的相对高度。(图 3、4)。

3.2 花岗岩地貌年代和夷平面

德国气候地貌学家 Büdel 说过,“中新世时可以在全世界任何地方找到夷平面”^[5]。据对研究夷平面的文献的统计,中新世是世界形成夷平面最多的时期。当时构造稳定,全球广泛发生海侵。据作者研究,在中国湘、桂、黔、滇、川、藏一线,在中、上新世形成了广泛的夷平面,现已被不同的抬升幅度分割成高差达 5000 m 的不同地面^[9]。在中国东部如粤、桂、湘、鄂、皖、鲁等低台阶地区(图 5),以及由东海至秦岭的低、中台阶地区(图 6),高差 1800~2000 m 的地貌面在花岗岩区分布广泛,明显突出在地势较低的丘陵山地之上,显然是一个已经中度抬升的夷平面的一部分。此面在晋西、鄂尔多斯、鄂西、湘西、桂西高度变为 1100~1300 m,即中台阶之代表性高度地貌面,可相当于鄂西期地面。此外,还有更低或更高一些的,如海拔 800~1000 m 和 1500~1600 m 等。

据卢欣祥报道⁵⁾,秦岭及其东延部分,在静宁期的花岗岩体上有古河床砂砾层,在中生代娘娘山岩体上也有第四纪堆积,表明此一构造隆升的山已被夷平。薛祥熙认为,秦岭的急剧隆升当在中更新世之初,距今 78 万年前⁶⁾。此时,在昆仑山和黄河中上游正为昆仑—黄河运动时期^[10],青藏高原部分山地被抬升到海拔 3500 m 的雪线高度之上,并出现了冰川。目前倾向于认为那些面是统一的中、上新世夷平面断裂解体后残留的。国际上公认一个大范围跨流域的夷平面形成需要 10Ma BP 以上的时间,而夷平面与其上覆的风化壳是同时发生的。

据研究,在石灰岩地区,现今地表 1 m 厚的风化壳的残留,需要有 627 m 的灰岩层

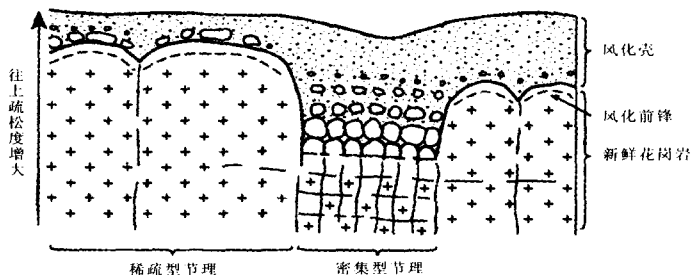


图 2 花岗岩双面风化壳示意图^[7]

Fig. 2 Schematic diagram illustrating the two-stage development of bornhardts

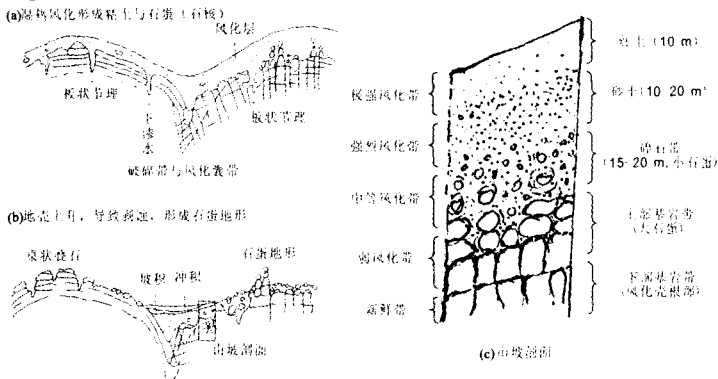


图 3 花岗岩剥露地貌剖面图及风化强度分带剖面图^[4]

Fig. 3 Granite exhumed landform and weathering degree section

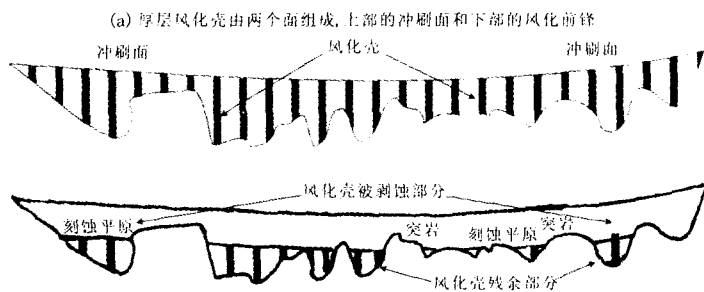


图 4 风化壳与风化前锋即刻蚀平原形成的“双面”模式^[6]

Fig. 4 Double-surface model about the development of the weathering crust and the eroded plain

5) 卢欣祥, 冯进城. 河南省花岗岩地质地貌概论. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 91-100.

6) 吴成基, 郭锡智. 秦岭北坡陕西段花岗岩地质地貌景观及开发. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 140-146.

被风化^[11, 12]。桂、湘地区普遍存在厚 3 m 的风化壳, 意味着曾经有近 2000 m 的灰岩被风化剥蚀掉, 这需要很长的时间。遗憾的是, 目前尚无对花岗岩地区风化壳形成的类似计算, 但可以推测, 我国东部广泛分布的晚燕山期花岗岩 (距今 1.0~1.5 亿年之间), 出露于地表之前其上至少有 5000 m 的盖层被剥蚀, 而后花岗岩体上部才开始风化。假设花岗岩

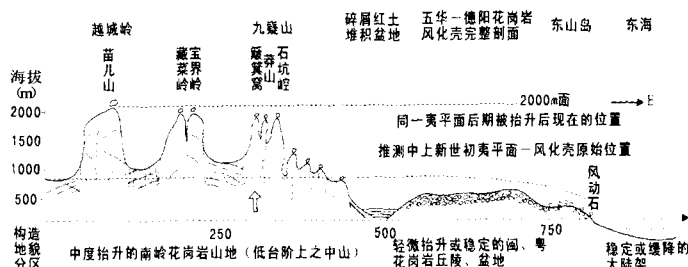


图 5 南岭—东海一线中—上新世夷平面 (包括风化壳) 抬升变形与花岗岩地貌宏观发育、分布示意图

Fig. 5 Granite landform development and distribution according to the Miocene and Pliocene planation surface uplift along the Nanling-East China Sea section

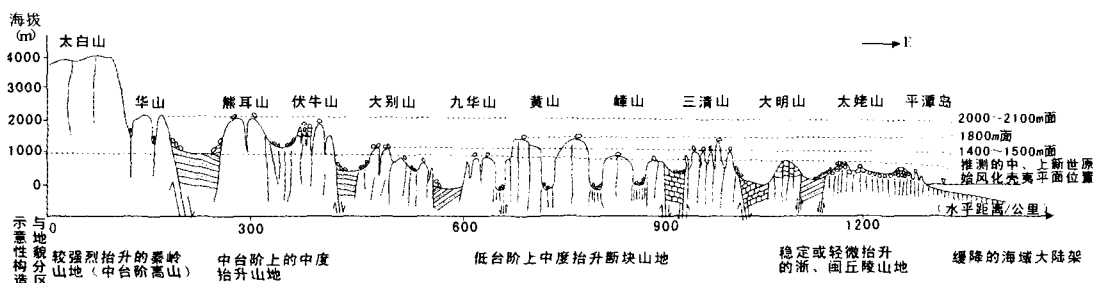


图 6 中国东部秦岭—平潭岛花岗岩山地构造、风化壳—夷平面、地貌及其演化示意图

Fig. 6 The granite landform development according to planation surface evolution along the NWW section of Qinling Mountains to Pingtan Island, eastern China

体上部就是灰岩, 5000 m 的盖层被剥掉后应该残留 6~7 m 的红色风化壳, 花岗岩体若继续被风化几十米到百米 (表 1), 其所需全部时间上溯到距今 20 Ma 的中新世也是可以理解的。

3.3 花岗岩风化壳—夷平面与构造运动

厚层花岗岩风化壳只有在构造稳定、长期风化的环境下才可形成。在较近的地质时期, 这种环境在中国只能是在中、上新世夷平面发育时才才有可能。由我国南方从西到东从高到低大范围双面风化壳分布看, 它跨越各种构造和岩性区, 包括大面积灰岩、花岗岩以及砂岩、玄武岩等 (图 5、6)。作者在川、滇、藏等地区用再结晶方解石裂变径迹的方法测定夷平面在石灰岩区之年代, 结果有 20 个样品均介于 18~8Ma BP 之间^[11]。而夷平面的原始海拔高度, 国内外均一致推测为 500~1000 m 之间。距海近则趋低, 如广东、福建、浙江等; 距海远则高起, 如云南、贵州、西藏等地区也不应超过 1000 m。推测此夷平面坡降在 0.1% 左右, 总体坡降很平缓, 尽管夷平面上可以保留个别高出数百米的高地。

Budel 研究印度德干高原花岗岩夷平面时, 认为该夷平面形成于中新世^[5]。但从马得拉斯海滨到西部高地, 迄今是一个仍在发育的夷平面, 海拔高度从海滨 200 m 到内地为 1000 m, 比降小于 2‰。极其平坦的夷平面上河流只起输水作用而没有任何侵蚀—搬运作用^[6]。这一夷平面和我们对其北面青藏高原及其东延云、贵、湘、桂地区中新世夷平面研究所得的结论很一致。在中国该夷平面在现代其最低海拔部位表现为灵渠地区湘、漓二水的源头相互并列穿插, 分水岭只剩下相对高差低于 30 m 的小丘群, 海拔 150 m 左右, 流域比降 0.5‰ 左右。这些数据都是可以参考的^[5, 6, 9, 13]。

在此,也假设我国近海地区此夷平面高度在 150 m 左右,其上之风化壳也较易保存。若以此为起始高度,推测浙、闽沿海有石蛋保留的各景点区新构造抬升应较和缓,不超过几十到几百米。而福建太姥山的 900 m 海拔则显示局部中度的抬升。若以造型石(石蛋层)作为风化壳底部弱风化层所在位置的标志,也可作为一种新构造抬升幅度的标志,可推测在黄山、三清山、南岭诸峰曾发生较强烈抬升,其抬升量至少是 1500~1800 m 左右(图 5、6)。

相反,广东五华、德庆花岗岩风化壳保留完好,只有沟谷侵蚀,则标志着构造稳定或轻度抬升(100~200 m)。介于上述二者之间的,视风化壳各层保留程度,则为几百米至千米范围的中度抬升(图 7)。湖南衡山抬升前后的花岗岩风化壳则是最好的例子(图 8)。

4 花岗岩地貌分类、形态特征与演化

4.1 地貌分类

结合中国实际和国际研究现状^[7, 15-17],作者把花岗岩地貌分为四类,八种类型^[15, 16]。

(1) 化学风化壳类

① 侵蚀的丘陵沟谷型:低矮丘陵和沟谷深切相对高数十米,沟头呈半漏斗状,称作岩岗地貌,能看到风化壳的各层出露在剖面上。如在广东,其海拔多低于 200 m,有严重的水土流失,难以构成风景点。如广东五华、德庆等地,此类代表构造稳定,或距侵蚀基准面(海面、主河河床)较远地区。否则,同类地貌若在海边,其风化壳会全部剥蚀殆尽,而使石蛋层广泛出露,如福建东山岛、鼓浪屿,海南岛的天涯海角、香港望儿山、珠海、青岛海滨石蛋群等。可见同时形成的石蛋层却有不同暴露时间。以上各地可划为中、小露突岩型。

(2) 化学风化壳剥露类:形成于风化前锋面上,因后期缓慢抬升风化壳遭剥蚀而暴露,其后稍受修饰,基本保持原形态。

② 露突岩型(bounhands, 又称伯恩哈德

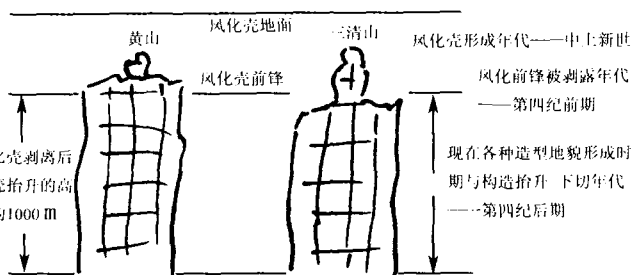


图 7 中国南方部分花岗岩地貌发育过程及年代分解示意图
Fig. 7 Inferred diagrammatic sketch on the granite landform evolution and epoch, southern China

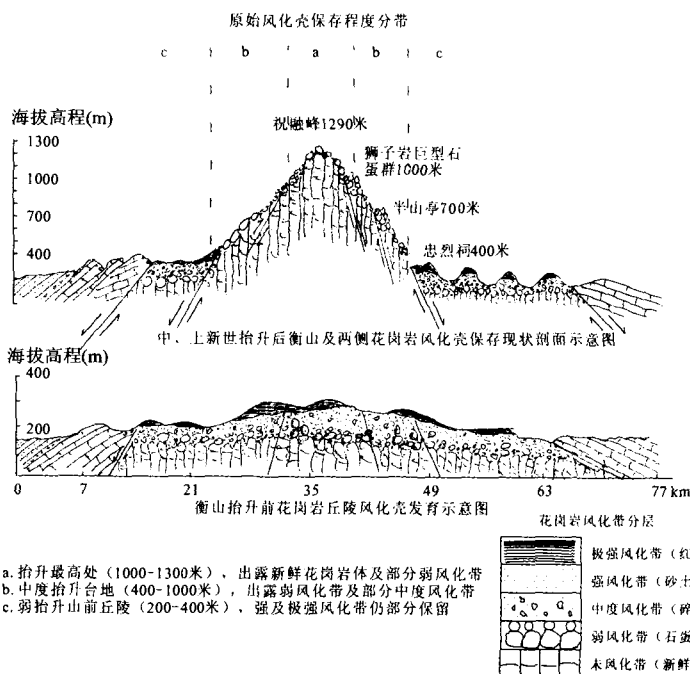


图 8 湖南衡山抬升前后花岗岩地貌表现^[14]

Fig. 8 The granite landforms of Hengshan Mountain, Hunan

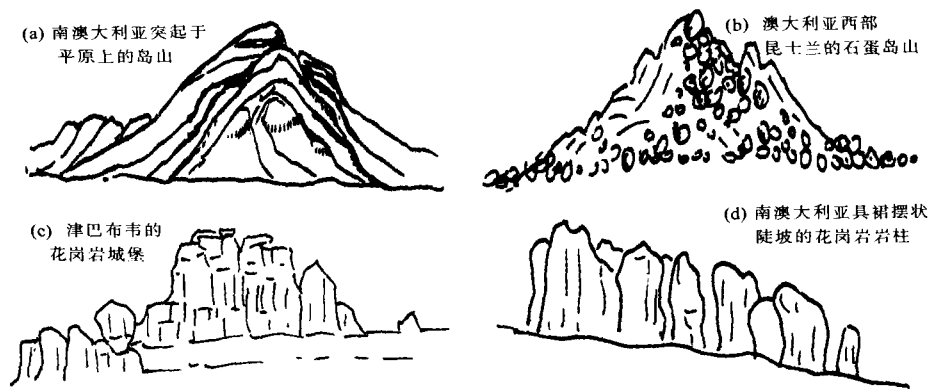


图 9 花岗岩露突岩型的主要形态^[7]

Fig. 9 Landforms of the Bounhands in the world

岩)，如基岩岛山 (rock inselberg)，有裙状陡坡及边麓平台的岛山，石蛋岛山 (boulder inselberg, granite nubbin)，柱、塔、峰或峰丛，基岩城堡 (castle koppie) 等，各种造型石和断层崖，相对高和直径几十到几百米，它们是风化剥蚀类花岗岩地貌的主体，(图 9)^[7, 15-17]。从全球看，此类地貌多出现在现代比较高温干燥地区，如非洲中部津巴布韦^[7]和澳大利亚中、西部。

③ 中、小露突岩型，多见于我国东部沿海花岗岩分布区，原始风化壳在轻度抬升的背景上遭受剥蚀，上部强风化带和极强风化带也基本被剥蚀，而局部保留弱风化带之石蛋群或石蛋个体，形成众多造型石，如青岛崂山及海岸带、福建平潭 (图 10)、东山岛风动石、鼓浪屿的风动石、海南岛的天涯海角和香港的望儿山等景观⁷⁾。

本型各类地貌和前述化学风化壳之侵蚀丘陵沟谷型可以视为同一时代的风化壳遭受差异侵蚀所致，在不同地域 (内地和沿海) 到侵蚀基准面 (海洋) 距离不同，所遭受侵蚀的程度和时间也不同。

④ 中、小凹地型：直径几十厘米到几米，深几十厘米到几米的岩盆、锅穴、岩碟、坑、岩槽 (陡崖上垂直悬沟)^[15]。在我国 (主要是北方) 花岗岩体表面主要由物理风化和风蚀所造成的“锅穴”亦可列入此类型，类似的岩盆在非洲和澳大利亚也有^[7, 17] (图 11)。

(3) 化学风化 + 抬升下切类

(a) 看澳海岸的花岗岩风化壳



(b) 风化壳后期抬升



(c) 残留弱风化带内石蛋层



(d) 石蛋类造型石块

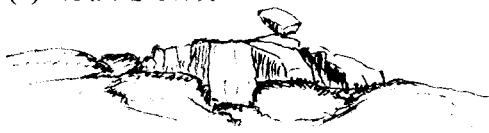


图 10 福建平潭岛海岸花岗岩地貌⁸⁾ (据杨逸畴照片改绘)

Fig. 10 Granite landforms on the coast of Pingtan Island, Fujian province

7) Ng Chun Yeong. 香港花岗岩地貌地质旅游的开发. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 222-232.

⑤ 残留“石蛋”——独立巨峰型：孤立与较强烈抬升下切造成的大型峰体上部，如黄山的“猴子望太平”、飞来石、三清山的司春女神、猴王献宝等，以及天柱山、石人山、鸡公山、太姥山等大量造型石^[18-22]，均为保留自原来的风化前锋的石蛋群。巨型峰体则因为构造抬升下切所致，此抬升下切造成的巨大峰体与风化过程无关，因而是两种过程相加而成。因此也可以说，上述化学风化类地貌意味着构造抬升轻微或稳定，而风化—抬升下切类则意味着风化壳遭剥蚀时或其后有连续的而较强烈的构造抬升导致持续深切，这是一种“山峰+峡谷”型地貌，其原始风化前锋的影响已经减弱(图12,图13)。我国广泛分布的花岗岩风景区，如黄山(图12)、三清山、天柱山等均属此类，也是我国有代表性的花岗岩地貌类型。

⑥ 抬升下切巨峰型：更持续的抬升、下切、剥蚀，基本上已无风化壳前锋痕迹。如华山、安徽嶂山(图13)和美国的约瑟米蒂国家公园等。

(4) 物理风化剥蚀类

⑦ 寒冻剥蚀型：如冰缘岩柱(Tor)或称寒冻石林。只发育在温带寒温带地区，尤其是北半球中高纬度地区在更新世寒冷气候下，即冰缘环境时间很长，影响深刻，与前述发生在热带、亚热带的双面风化壳无任何直接联系。中、高纬地区和高山地区一样(5800~6000 m)，花岗岩体裸露地表后，寒冻风化可以造成成群冰缘石柱，高几米到几十米，如珠穆朗玛峰中绒布和东绒布之间的山梁上，云南点苍山上的片麻石林(3300~3500 m)，以及内蒙古克什克腾旗(北纬41°)的阿斯哈图山冰缘岩柱石林等，都是典型代表。

⑧ 风化—风蚀型：风化—风蚀平台，风化—风蚀柱，风化—风蚀穿洞、龛、槽、锅穴等。作者在上述分类中特别提出风化—风蚀类型，因为我国内蒙古、河北北部一带常年吹偏西风，时间约占全年的70%。花岗岩岩体在此种环境下大面积的基岩表面直接风化成不同粒级的砂粒，并被风、水搬走。据现场考察发现，在赤峰地区花岗岩山地(海拔800~1000 m)，风蚀锅穴迎风面有发育数量多，规模大，口小肚大等特征，且锅穴长轴顺风向延伸，以及锅穴内仅有20 cm左右厚度的砂层而绝无砾石等判断，它们确是风化和风蚀共同形成的，在锅穴从



图11 南澳大利亚岩盆
(直径2 m左右, 深约0.5 m)^[7]

Fig. 11 Rock basin in South Australia

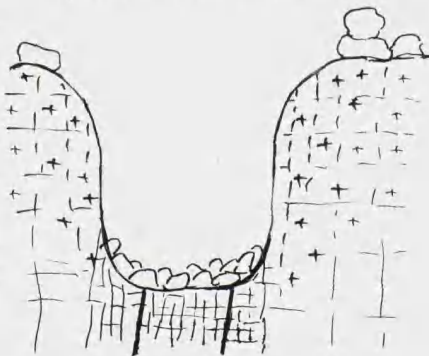


图12 黄山立马桥
(地貌差异显著谷地和两侧峰体构造裂隙与节理密度不同)

Fig. 12 Landform distinguishment between the valley and the lateral highland at Limaqiao, Huangshan, resulting from the difference of the fractures and joints

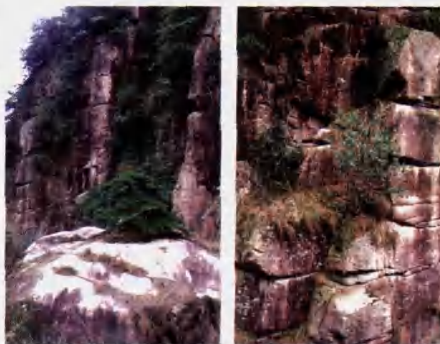


图13 安徽绩溪嶂山花岗岩体节理疏密与地貌特征

Fig. 13 Granite landforms characteristics based on the density of joints at Massif Zhang

小到大、从浅至深(最大直径 8 m, 深 4 m, 最小直径 10 cm, 深几厘米)的过程中, 大量来自风化的颗粒, 在旋迴风作用下, 一方面可以打磨锅穴四壁, 旋迴一定时间后又被风吹出锅穴带走, 是故形成口小肚大的特征, 以致有相邻锅穴被磨蚀穿透而形成风蚀穿洞。此处(北纬 42°~44°)与新疆准噶尔盆地古生代花岗岩区的风蚀龕、风蚀柱都是特定干旱区—半干旱区气候的产物, 特点为: 降水少、蒸发作用强、日照时间长、太阳辐射强、昼夜和季节温差大, 可导致强烈的物理风化。此外风力大、风蚀作用强有利于风化产物—沙子的搬运, 被崩解的花岗岩各种矿物成分均被及时搬走, 同时伴随强烈的磨蚀作用。这样才会形成深、宽数米, 且口小肚大完全封闭的锅穴地貌。数百个锅穴内仅有年代为 3000a BP 的细砂而没有磨圆砾石存在, 证明该地貌绝非任何种类的流水(包括冰下流水)冲刷的结果^[23, 24]。有些媒体说的所谓“冰臼”, 其实就是花岗岩体上因风化—风蚀而形成的锅穴。

值得关注的是, 此类以锅穴为代表的风蚀地貌群体只发育在花岗岩上, 在国外如美国亚利桑那州干燥区的风蚀龕(Tafoni), 就发育在花岗岩陡崖基部但成直立龕状, 而非竖井状, 这与花岗岩易于物理风化有关^[23]。

4.2 风化壳剥蚀的区域分异

前述地貌分类中, 在化学风化壳类之“侵蚀—丘陵沟谷型”一节中已提到花岗岩双面风化壳在后期剥蚀—侵蚀地貌过程中有区域分异问题, 即距离侵蚀基准面—大海近的地区侵蚀早(溯源侵蚀), 如广东、福建、海南等沿海区域, 风化壳已完全剥离, 以孤立的石蛋为特点。而距离基准面较远的地区如广东五华、德庆地区, 虽同属一个风化壳层, 其侵蚀—剥蚀还在进行, 被剥蚀的厚层粘土砂层堆积在坡麓。石蛋层还覆盖在风化壳中。由此可见, 上述两处风化壳形成年代是同一的, 而突露岩型地貌的暴露年代却明显不同。根据我国华南—青藏一线的夷平面的研究结果已知, 青藏高原的主夷平面形成于中新世^[12]。其东延的同一夷平面在贵州东部、广西、广东、福建、江西、安徽、山东等省, 即中国地势的低台阶上(图 5)。其海拔高度在 800~900 m 左右, 如福建太姥山高 917.3 m, 广西海洋山、猫儿山、八角寨均 800 m 左右。在广东, 大部分花岗岩山区海拔 900 m 左右普遍存在夷平面和厚层风化壳^[2], 但均已遭受强烈侵蚀。推测这一风化壳应是中新世统一夷平面的残留部分。现在上述各省出露的花岗岩造型地貌大部分是其风化前锋暴露所成, 然多出现在 1500~2000 m 之间, 这多出的近千米的高度应是第四纪构造抬升所致。

4.3 花岗岩地貌发育阶段的标志性地貌类型

根据以上认识, 可总结花岗岩地貌发育阶段的标志性地貌现象如下:

(1) 束状石林(图 15a) 以江西上饶三清山分水岭部位保留多而典型, 代表了原始风化壳底部的弱风化带与新鲜岩层(图 2、3), 也是风化壳的最底部, 即风化前锋位置。其存在表明抬升山地分水岭部位尚未被完全溯源分割, 是残留的原始地貌遗迹, 表示山体抬升切割已达到壮年期。若无束状石林而仅有柱状石林或峰林存在, 如黄山、九华山也有类似峰林保留, 尚处在壮年—老年过渡期, 而天柱山、大别山、石人山、华山、太白山等, 则也进入花岗岩地貌演化的老年期^[18, 19]。

(2) 石蛋—造型怪石(图 15b) 石蛋层是原始花岗岩风化壳的弱风化层的典型代表, 风化作用已全面进入一个花岗岩石块的四方六面。事实上已使此石块完全脱离了基岩母体, 只是还没有位移而已。风化壳被剥离后, 石蛋层则显露出各种造型。故造型石多的花岗岩山地表示地貌演化已处于青年期, 在我国东部表现为 1000 m 以下缓慢抬升或稳定的低山, 如福建平潭(图 10)⁸⁾。可以说今日平潭岛之花岗岩地貌景观就是昔日三清山的景观。峡谷及相对不高的石林和造型石正是尚未显著抬升下切的表现, 遍布的石蛋堆积也是风化壳刚被剥离的表现, 青岛崂山种种花岗岩地貌也显示相似的特点。

(3) 石林 + 峰林 相对高几十米到百米, 绝对高度达 1000 m 以上, 表示中度抬升的山地, 已经受强烈的切割, 地貌发育已进入壮年—老年期, 如黄山、三清山、天柱山、石人山、簸箕窝、莽山等^{7,9)}。

4.4 花岗岩地貌的演化过程与成景地貌阶段

从三清山石林类型水平与垂向分布规律可清晰看出花岗岩石林地貌发育和时空演变规律⁹⁾:

第一阶段: 成景地貌前期, 整体状或平台状的花岗岩体 (图 14);

第二阶段: 成景地貌初期, 束状、平台状石林, 如云南来古石林区, 石林顶高相近或稍有差别, 仅断裂、裂隙处被切割较深, 个体石柱尚未分开 (图 15a), 仍连成一片, 高差相对较低, 三清山“万笏朝天”景点就是一例;

第三阶段: 成景地貌中期, 束状—柱状石林, 束状石林被进一步分割, 柱状个体形成 (图 15c), 如三清山的火箭峰等;

第四阶段: 成景地貌盛期, 柱状石林, 皆单独成柱, 但彼此仍排列成行;

第五阶段: 成景地貌晚期, 仅剩柱状孤峰, 如三清山“巨蟒出山”景点 (图 15d)。

上述五种类型代表了石林演化的五个阶段, 主导演化的是构造抬升背景下风化壳遭流水切割以及切割的程度。三清山分水岭上的束状石林到沟谷中的柱状孤峰的分布规律表明, 沟谷中心部分最先遭受侵蚀下切, 也最先达到石林地貌演化的晚期—柱状孤峰, 它只是当初整体状地貌被剥蚀后的个别的残留, 可以体现原始整体状地貌已经被剥蚀的规模。稍早阶段的束状石林, 束状—柱状石林和柱状石林则分别呈现在三清山主要景区从沟谷中心到分水岭的不同地貌部位上 (图 14)。

成景地貌除有水平方向的演化规律外, 同时存在垂直演变规律。因为冲沟溯源侵蚀除有上下游部位差异外, 在垂向上也有差异, 那就是当上部老年期的成景地貌趋于消亡时, 下部处于幼年期的成景地貌正在出露。可见这是一个在相当长的地质时期内成旋回的演化过程, 一个成景地貌旋回的结束, 意味着下一个演化过程的开始。这就是花岗岩成景地貌的旋回。

从全球或全国范围看地貌演化阶段, 可按上述各类花岗岩地貌的存在状态进行组合, 根据主要类型所占分量和地位把不同花岗岩山地归入幼年期、壮年期、老年期 (表 3); 从一个山地个体看, 也可以把山地的不同地段划分为幼年期、壮年期、老年期; 具体到某一景区或一个从河谷到分水岭的地貌单元看, 也可以划分幼年期、壮年期、老年期。这表明所有花岗岩地貌的时空变化都是很有规律的。

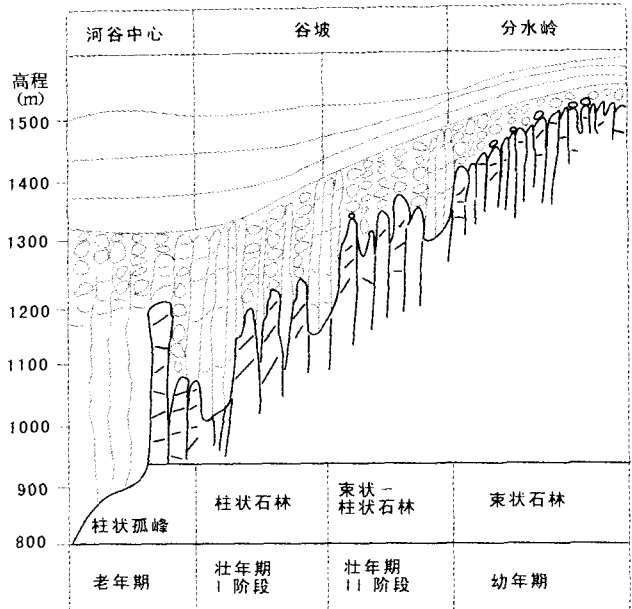


图 14 三清山从河谷到分水岭花岗岩地貌类型与发育阶段及其与原始风化壳的关系

Fig. 14 The relationship between the weathering crust and the granite landform types as well as its development, from the valley to the divide, Massif Sanqing as an example

9) 尹国胜, 杨明桂, 马振兴等. “三清山式”花岗岩地质地貌景观研究. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 62-83.

4.5 花岗岩地貌演化的时空格局

一般而言，河流（无论主流、支流）都是溯源侵蚀，故在以河流侵蚀为主的地区，河流下游较中上游被侵蚀时间长，切割深度大，会先达到地貌演化的“老年期”。相反，而向上游或同一坡地的上方去，地貌发育会比较年轻。

以三清山从河谷到分水岭的地貌剖面为例（图 14），“巨蟒出山”处已达老年阶段，“万笏朝天”所在的分水岭的束状石林表示石林发育的幼年阶段，介于两者之间的柱状石林则属于壮年阶段。以张家界的天子山砂岩地貌为例，核心部分仍保留有大面积平坦的未见切割的高地或平台（海拔约 1100 m）。向河流下游即山体外围，则可见多处高大的石墙，其一端仍与前述平台相连，显示正在被河流分割过程中；再往山体外围，可见孤立的峰、柱地貌林立，表示石墙进一步被切割的结果，已达到地貌发育的晚期。因为只要峰、柱倒塌，则标志这一地区的抬升一下切发育旋回已经完成。同样，在气候区完全不同的内蒙古阿斯哈图石林也只残留在分水岭上成行保留，早期山坡的花岗岩石林均已消失殆尽了^[10]。

据卢欣祥观察^[9]，河南省花岗岩地貌区的山体内部成景简单，山体边缘与盆地或平原交界处成景复杂，多造型石，如河南嵯峨山和洛宁神灵寨。此外，黄土地区地貌发育的塬—梁—峁也是同一规律，以及石英岩的崂山岩地貌、红色砂岩的丹霞地貌等无一例外。

5 气候地带性对花岗岩地貌发育的影响

5.1 地带性差异风化与花岗岩地貌

一般而言，花岗岩中主要矿物石英、长石结晶度高，并呈良好的镶嵌结构，质地坚

表 3 我国热带亚热带代表性花岗岩山地地貌演化阶段分类

Tab. 3 The granite landform evolution stages in tropics and subtropics of China

演化阶段	亚阶段	代表山地	地貌特征
幼年期	初始期	五华山（粤）	花岗岩体风化壳正在侵蚀剥离，大部分保留
	中期	平潭（闽）	轻度抬升，花岗岩风化壳局部残留，石蛋层保留好
壮年期	盛期 I	三清山（赣）	中度抬升下切，石林、峰林发育，原始风化壳剥蚀行将殆尽，仅残留局部石蛋层
		黄山（皖）	
老年期	盛期 II	华山（陕）	强烈抬升下切，高山峡谷，基本无原始风化壳遗迹保留，无峰林、石林
	中低山	泰山（鲁）	构造稳定古老花岗岩区，山体相对和缓



图 15 三清山花岗岩地貌

Fig. 15 Granite landforms of Mt. Sanqing

10) 钱方，赵治中，何培元等. 花岗岩石林的发现、成因及其意义. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 101-105.

硬, 抗风化能力强。但岩石中各种矿物的膨胀系数差别较大, 如石英和长石可相差近一倍。在热胀冷缩过程中, 花岗岩表层很易破碎, 有利于鳞片状剥落。在湿度、气温变化大的我国温带和寒带, 尤其是华北—东北接壤地区, 物理风化可以使大面积花岗岩表面直接从基岩风化为砂粒, 随即被风、水带走。

同时, 花岗岩为块状结构, 坚硬致密, 抗压力强 (147~225 Mpa), 孔隙度小 (为页岩的1/5)、不透水。若无多组裂隙穿插其间, 水及其他助风化的化学物质是很难深入岩体内部^{1,3)}。花岗岩抗化学侵蚀能力强, 比灰岩高 12 倍。

花岗岩和灰岩在我国北方和南方对化学风化和物理风化有完全不同的反应。以秦岭—淮河 (实质是以 800 mm 年降水线和 1 月 0 °C 等温线) 为界, 以北以物理风化为主。若花岗岩与灰岩 (致密不易被物理风化侵蚀) 相邻, 花岗岩表现为物理风化抵抗力很弱, 形成低丘和凹地; 而其周边的石灰岩或燧石条带灰岩则对物理风化抵抗力极强, 表现为高山。如周口店灰岩的猫耳山海拔 1350 m, 而其下的花岗岩丘陵只有 200 m 左右; 又如延庆的花岗岩“石槽”和延庆北山古岩居风景区等。相反, 在以化学风化为主的我国南方热带—亚热带地区, 有大量花岗岩类高山 (华山、黄山、衡山、三清山、五岭主峰等)。他们抗化学风化力比相邻区域的石灰岩强, 故石灰岩区则多沦为高差不到 200~300 m 的低丘、洼地, 如黄山、三清山及衡山周围等。由此也可以体会到花岗岩在不同的气候环境下, 对化学风化和物理风化有完全不同的反应。当然这一切都是相对而言。

5.2 花岗岩地貌的“多代性”——气候地带性变化的标志

在认识上述特征时还应考虑受气候影响很大的岩石地貌发育“多代性”特点。上新世时我国亚热带北界到达大青山—辽东半岛一线, 即北纬 41° 左右, 纬度至少北移了 5°。故可以在大青山花岗岩体未被后期完全侵蚀的部位看到残留的亚热带化学风化壳剖面, 石蛋层也很清晰。在辽东半岛也可以看到在石灰岩上同时形成的覆盖型石芽和相应的红色风化壳。这种由“多代性”造成的看似矛盾的现象增加了气候地貌研究的意义和难度。

5.3 气候带对花岗岩地貌发育的严格控制

从全球范围看, 在非洲、澳洲、拉丁美洲等大多数处于南北纬 20° 以内的低纬热带地区, 花岗岩多形成浑圆低矮的花岗岩丘陵; 40°~50° 以上中、高纬度地区, 如我国秦岭淮河以北, 则以物理风化作用为主, 向高纬方向, 则寒冻风化作用强烈, 缺少较强的流水切割, 花岗岩易风化成低山、缓丘, 如我国大、小兴安岭一带以及内蒙地区。

只有在北纬 25°~35° 的中、北亚热带之间, 可充分发育花岗岩造景地貌, 我国的花岗岩风景名胜多集中于此, 如三清山、黄山、天柱山、石人山、熊耳山、华山等均位于此地带中心部位 (图 6), 本地带南侧的南岭山地、九嶷山簸箕窝、莽山、石坑崆等 1900 m 左右的山地, 也有峰林、石林发育, 但花岗岩地貌的多样性皆不可与中心区域相比¹¹⁾ (图 5)。

中国花岗岩的地带性地貌景观, 也是基本以北纬 35° 为界。此界以南, 无论花岗岩山地海拔和相对高度的高低, 造型石普遍较多; 而此界往北, 如山东、山西、河北、辽宁、内蒙等地, 除个别山地如崂山外, 均少或无造型石, 这也是一个重要标志。崂山的石蛋层应是中上新世热带风化壳的残留。

6 花岗岩岩性构造对地貌演化的影响

花岗岩岩石性质对地貌演化有着不可忽视的影响, 这一点可以从静态地质构造格局、动态构造运动和作为构造抬升标志的花岗岩风化壳地貌三方面论述。

11) 方建华, 谢俊卿, 王伟峰等. 崂山花岗岩地貌景观特征分析. 第一届国际花岗岩地质地貌研讨会交流文集—中国三清山, 2006, 140-146.

6.1 岩性的差异对地貌演化的影响

所有研究花岗岩地貌的学者,大都从断裂和节理体系控制花岗岩发育为切入点,这无疑是正确的^[9],但研究并不深入,而构造控制作用则没有比在花岗岩地貌发育中体现得更明显的了。此外还应注意,花岗岩的岩相变化、矿物组合、结晶等也都在花岗岩地貌类型、分布、造型、规模、发育方式等方面发挥作用。

岩性差别(花岗岩内部不同岩石单元之间的差别)也能导致花岗岩地貌的不同形态。如黄山由时代和岩性不同的几个花岗岩体组成,地貌差别很大,故有“前山雄伟,后山秀丽”之说。主阶段粗粒花岗岩形成几大著名山峰,如莲花峰、天都峰。晚阶段入侵的狮子林细粒花岗岩是浅成侵入体,形成的是北海—西海一线小而奇丽的次一级山峰。早期的太平花岗闪长岩,因本身性质不如前者硬且出露时间较长,经长期风化形成起伏和缓的丘陵^[1,3,4]。

三清山也有类似显示。主峰玉京峰等主体所在地段,岩性为边缘相细粒(微细粒)含斑—似斑状黑云二长花岗岩,且节理稀疏,故岩体稳定性高。而石林和造型石众多的东部主景区除有上述同样边缘相花岗岩外,还有大面积过渡相中细粒斑状黑云钾长花岗岩分布,后者矿物颗粒较粗且斑晶含量多而稳定(18%~20%),晶形较大(7~20 mm)。相对而言,后者较易风化,且节理裂隙更为密集,故地表更易切割。虽山峰不及玉京峰主峰高大,但众多奇秀的景观更引人注目^[9]。

华山以二长花岗岩为主,属燕山早期岩株。华山以五峰并列似花朵而得名,实为分支岩株出露地表。基本未经节理裂隙切割,陡峻雄伟,其中三个主峰均超过 2000 m。

6.2 断裂和节理对地貌演化的影响

断裂、节理的多少、类型及其组合方式,是花岗岩地貌形成的重要控制因素。其中断裂(包括断层)控制山体格局,而节理控制山体的造型和造景地貌。

6.2.1 不同节理类型的影响

(1) 垂直节理 节理分布稀疏的花岗岩抗侵蚀能力强,风化过程很难深入;而节理密集的花岗岩抗侵蚀能力大减,地表水地下水沿节理活动,特别是沿垂直节理,水和具风化性的化学物质可以长驱直入。但垂直节理多半只作为通道而不易存水,而水平节理和横节理不但是通道而易于存水进而促进风化。

垂直节理主导的花岗岩山区多挺拔陡峻,形成峰林和壁立千仞的悬崖峭壁。它们是在山体抬升下切的过程中,由风化侵蚀发生沿垂直节理的崩塌。在山坡后退过程中,始终保持坡度陡峭。此时,沿临空面发生的次生卸荷节理也是导致沿陡崖面的大型崩塌的主要原因,如三清山。

稀疏的节理,特别是稀疏的垂直节理(纵节理, S 节理)是大型花岗岩峰体(或峰林)存在的条件,如华山、黄山(西部)、嶂山(东部)(图 12、13)等。中等密集的节理,特别是中等密集的垂直节理,是大范围花岗岩石林发育的条件,如三清山。同时也是导致其他众多花岗岩山地发育一般的石林、岩柱(Tor)、城堡状、石塔状等花岗岩造型地貌的主要条件。以上各山区如黄山、华山等也都是垂直节理发育,尤其是峰体周边的卸荷节理十分发育。因此可以说垂直节理是造型、造景的节理。据研究,即使在风化带中,垂直节理也保留时间最长,可视度也高^[25]。

(2) 横节理 横节理(Q 节理)因为往往有一定的斜度,俗称斜节理。横节理在三清山索道沟谷两侧表现明显,倾角约 30°~50°。在部分柱状石林地段,可见石柱上部顺斜节理产生滑塌,残留的基部保留的斜面十分清晰。横节理显然也参与地貌的造型过程,但从旅游景观地貌的角度看,它是破坏景观的,不利于柱状地貌的造型和长期保存。如果斜交层理发育,则峰型很少呈直立陡崖,如泰山所见;若斜交层理角度很小,则类似水

平层理就更难形成陡峻山峰了。

(3) 水平节理 水平节理(L节理)在整个花岗岩地貌形成过程中,不利于形成陡峻的山体和峰林、石林等造型、造景地貌,不利于外力风化、侵蚀、深入切割地表和地下的岩体,而利于在地表形成平缓的山丘和平坦地面。因为沿水平节理很易产生风化,也容易导致在石林形成后快速崩塌,在石林外围堆积成石海、石流坡等平缓地面。一般而言,高差比较平缓的岛山和石蛋岛山都受水平或斜交层理控制(图9、10)。如内蒙古阿斯哈图石林(海拔约1700 m),相对高5~20 m,连绵几百米,底部多在同一高度,即大兴安岭夷平面上,是最后残留在分水岭的少数幸存者,广大山坡部分石林已消失殆尽⁹⁾。

伏牛山由在板块和造山体制下形成的不同花岗岩组成,有不同的花岗岩地貌类型。在800 m以上主峰区,广布阵列式峰丛、峰林。因水平节理和卸荷节理主控而形成的“擦擦石”,形如档案匣叠置,图腾柱以及复活节岛人形石,巨型石柱等。此外,还有众多起伏和缓的穹形山地。花山峪等地岩体片状剥落形成中间高、四周低的岩盘山形地貌景观⁹⁾。

(4) 节理的造景功能 按节理与地貌景观之关系,可划分各种节理的造景功能:

原生节理:1) 造景节理—垂直节理,越深入越有利于造景,如三清山、黄山最典型;2) 保景节理—水平节理,越水平越稳定(倾角小于20°者);3) 损景节理—横节理(斜节理),倾角大于20°者,斜度越近于45°越不利,在三清山,大多介于30°~45°之间。

后生节理:卸荷节理是损景节理,在临空条件下,坡面受卸荷(失去依靠和支撑)控制,进一步发展必沿此节理造成崩塌。

6.2.2 节理的格局对地貌的影响 垂直、水平、斜交三组节理的格局、疏密、数量、走向等控制大型花岗岩地貌的分布规律和地貌格局。如黄山断裂和节理分布有疏密之分,各大谷地如立马桥谷地、桃花溪所在谷地皆与密集的断裂和节理分布区相吻合(图12),而各大谷地之间的峰体则节理、裂隙稀少。再如三清山,从构造体系图上看¹²⁾,除个别大型断裂作为区域控制外,其他裂隙、节理平面格局比较均匀。虽西北方向较集中,但各个方向都有,是故无论单个出现的造型石(即石蛋地貌)如司春女神、猴王献宝等,以及组合出现的观音赏曲、天门峰丛等在平面上分布比较均匀,不像黄山那样峰体和峡谷截然分开。再如安徽绩溪溪山大峡谷,峡谷本身发育于花岗岩和玄武岩交界之断层线上,而嶂山花岗岩中央偏西部位有一大范围的节理密集带,形成了一个次一级的峡谷。而两侧,尤其是东侧主体部分节理裂隙都很少,保存着相对高400~500 m的庞大完整山体,对比十分明显(图13)。

如内蒙黄岗梁南20 km之大青山上,海拔1500 m的燕山期花岗岩山地上有锅穴200余个,直径1~3 m,深0.5~1 m,口小肚大,高出西拉木伦河700 m,相邻北大山上则发育阿斯哈图石林,两者属于完全不同的正地貌和负地貌。在同一地区、相同气候条件下形成的地貌不同,取决于花岗岩结构、构造的差异。石林发育处垂直和水平节理发育,特别是水平节理密集,地表岩体被分割的十分破碎,加之寒冻风化以及流水和风力侵蚀形成石林;而锅穴发育处,花岗岩节理十分稀疏,更少见水平节理,花岗岩体整体性很强,只在浑圆山顶上被风化风蚀成大量负地形(锅穴)以及一系列配套的风蚀地貌。

又如美国加州的约瑟米蒂国家公园。该处花岗岩节理的规模和类型分布极其不均,大型无节理的花岗岩岩体常构成巨大的山峰和悬崖,如高出峡谷1200 m的Elcapitan几乎没有节理和裂隙,而其旁侧的岩体就发育有复杂的节理系统,从而形成城堡状石林地貌。在规模稍大的节理密集处,则形成柱状、筒状和尖顶状花岗岩山峰,如华盛顿岩柱、大教堂尖顶。当水平节理(席状节理)更为发育时,面状剥离则产生大型穹丘或圆丘(Dome),如哨兵圆丘,龟背圆丘等(Donald F. Palmer)²⁾。

12) 三清山国家风景名胜区管委会地质资料, 2005.

致谢: 感谢江西省三清山风景名胜区管理委员会为本文提供的资助。

参考文献 (References)

- [1] Марков К. К. Questions of Geomorphology. Beijing: Geological Publishing House, 1957. [马尔科夫 К. К. 地貌学基本问题. 北京: 地质出版社, 1957.]
- [2] Gilbert G. K. Geology of the Henri Mountains. Washington, 1877.
- [3] Zeng Zhaoxuan. Lithogeneous Topography. Beijing: Geological Publishing House, 1960. [曾昭璇. 岩石地形学. 北京: 地质出版社, 1960.]
- [4] Huang Zhenguo. Red Residuum in South China. Beijing: China Ocean Press, 1996. [黄镇国. 中国南方红色风化壳. 北京: 海洋出版社, 1996.]
- [5] Büdel J. The relief types of the sheetwash zone of southern India on the eastern slope of the Deccan Highlands toward Madras. Colloquium Geographicum, 1965, 8: 93-95.
- [6] Büdel J. Double surface of leveling in the humid tropics. Zeit Geomorph, 1957, 1(2): 223-225.
- [7] Twidale C. R. Granite Landforms. Amsterdam: Elsevier, 1982.
- [8] Ehlen J. Fracture characteristics in weathered granite. Geomorphology, 1999, 31: 29-45.
- [9] Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian et al. The initial elevation of palaeokarst and planation surfaces on Tibet Plateau. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(11): 934-938. [崔之久, 高全洲, 刘耕年 等. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度. 科学通报, 1996, 41(15): 1402-1406.]
- [10] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian et al. On Kunlun-Yellow River tectonic movement. Science in China (Series D), 1998, 28(6): 419-425. [崔之久, 伍永秋, 刘耕年 等. 关于“昆仑—黄河运动”. 中国科学(D 辑), 1998, 28(1): 53-59.]
- [11] Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian et al. The initial elevation of palaeokarst and planation surfaces on Tibet Plateau. Science in China (Series D), 1997, 43(11): 934-939. [崔之久, 高全洲, 刘耕年 等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 378-386.]
- [12] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian. Feature and origin of covered karst on Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet. Journal of Mountain Science, 2000, 18(4): 289-295. [李德文, 崔之久, 刘耕年. 湘桂黔滇藏一线覆盖型岩溶地貌特征与岩溶(双层)夷平面. 山地学报, 2000, 18(4): 289-295.]
- [13] Cui Zhijiu, Li Dewen, Liu Gengnian et al. Characteristics and planation surface formation environment of the red weathering crust in Hunan, Guangxi, Yunnan, Guizhou and Tibet. Science in China (Series D), 2001, 44(suppl.): 162-175. [崔之久, 李德文, 冯金良 等. 覆盖型岩溶、风化壳与岩溶(双层)夷平面. 中国科学(D 辑), 2001, 31(6): 510-520.]
- [14] Zhou Xuejun, Xia Weisheng. 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, 2004, 2(2): 28-34. [周学军, 夏卫生. 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, 2004, 2(2): 28-34.]
- [15] Campbell E. M. Granite landforms. Journal of the Royal Society of Western Australia, 1997, 80: 101-112.
- [16] Twidale C. R. Granite landform evolution: Factors and implications. Geologische Rundschau, 1986, 75(3): 769-779.
- [17] Twidale C. R. The research frontier and beyond: Granitic terrains. Geomorphology, 1993, 7: 187-223.
- [18] Zheng Yangui. Brief on the feasibility of the construction of the Tianzhushan Geopark. In: Chen Anze, Lu Yunting, Chen Zhaomian (eds.). Theory and Practice of the Tourism Geography: No.11 of the Symposium on Tourism Geography. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005. 146-151. [郑炎贵. 建立天柱山地质公园可行性概说. 见: 陈安泽, 卢云亭, 陈兆棉. 旅游地学的理论与实践: 旅游地理学论文集第十一集. 北京: 中国林业出版社, 2005. 146-151.]
- [19] Wang Zhuoli, Geng Pengxu. Geology residue and its exploitation for tourism in Henan Province. In: Chen Anze, Lu Yunting, Chen Zhaomian (eds.). Theory and Practice of Tourism Geography: No.11 of the Symposium on Tourist Geography. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005. 136-139. [王卓理, 耿鹏旭. 河南省地质遗迹及其旅游开发. 见: 陈安泽, 卢云亭, 陈兆棉. 旅游地学的理论与实践: 旅游地理学论文集第十一集. 北京: 中国林业出版社, 2005. 136-139.]
- [20] Yao Song'en. Presumption of the exploitation on the tourist resource of Taimushan National Geopark. In: Chen Anze, Lu Yunting, Chen Zhaomian (eds.). Theory and Practice of Tourism Geography: No.11 of the Symposium on Tourism Geography. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005. 105-109. [姚颂恩. 太姥山国家地质公园旅游资源开发利用

- 用设想(摘要). 见: 陈安泽, 卢云亭, 陈兆棉. 旅游地学的理论与实践: 旅游地理学论文集第十一集. 北京: 中国林业出版社, 2005. 105-109.]
- [21] Ma Hengwei, Liu Xiaohong. Review on the twelve splendid landscapes in Massif Sanqingshan. In: Chen Anze, Lu Yunting, Chen Zhaomian (eds.). Theory and Practice of Tourism Geography: No.11 of the Symposium on Tourism Geography. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005. 212-215. [马恒玮, 刘晓红. 试论三清山区十二绝景. 见: 陈安泽, 卢云亭, 陈兆棉. 旅游地学的理论与实践: 旅游地理学论文集第十一集. 北京: 中国林业出版社, 2005. 212-215.]
- [22] Zhang Ke, Huang Yukun. Researches on the planation surfaces in north Guangdong. Tropical Geography, 1995, 15(4): 295-305. [张珂, 黄玉昆. 粤北地区夷平面的初步研究. 热带地理, 1995, 15(4): 295-305.]
- [23] Cui Zhijiu, Li Hongjiang, Nan Ling et al. The discovery and environmental significance of Chifeng wind route and huge pots of Inner Mongolia and Hebei Province. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(16): 1531-1536. [崔之久, 李洪江, 南凌 等. 内蒙、河北巨型壶穴与赤峰风道的发现. 科学通报, 1999, 44(13): 1429-1434.]
- [24] Li Hongjiang, Cui Zhijiu, Zhao Liang. Origin of pots in Inner Mongolia and northern Hebei: Also about the classification of pots. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(2): 223-231. [李洪江, 崔之久, 赵亮. 内蒙、河北山区壶穴的成因探讨: 兼论壶穴成因分类. 地理学报, 2001, 56(2): 223-231.]
- [25] Ehlen J. Fracture characteristics in weathered granites. Geomorphology, 1999, 31: 29-45.

The Type and Evolution of the Granite Landforms in China

CUI Zhijiu¹, YANG Jianqiang², CHEN Yixin¹

(1. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: With the subtropical monsoon climate in southern China, the planation surface and the crust of weathering developed into many particular granite landform types, such as that on Mt. Huangshan and Mt. Sanqingshan, as a result of the uplift and down-cut in the following tectonic movements. In this paper, the temporal and spatial development discipline of the granite crust of weathering and landform was discussed, and the close relationship between the landform age and planation surface was studied. The connections of the granite landform and the crust of weathering were also put forward in different uplift background. Based on that, the uplift extent of massifs can be presumed, which would be ~200 m at coastal region, and increase to 1600-2000 m at the Nanling Mountains or Dabie Mountain and Funiu Massif.

Key words: China; granite; landform; planation surface; climate; tectonic movements