

风化基座的双层夷平结构及其意义

——以粤北坪石盆地第6级河流阶地为例

刘昆^{*}, 高全洲^{*}, 焦树林, 王振刚, 余建伟, 何健
(中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 武江在坪石段共保留下6级基座阶地。坪石的多级基座阶地是在与粤北金鸡岭夷平面同期发育的准平原基础上, 由河流的阶段性下切所形成。本区由于受以掀斜运动为特征的新构造运动的影响, 阶地所在的西南岸台地区抬升速率约为0.073 m/ka, 大于金鸡岭夷平面0.066 m/ka的抬升速率, 致使武江在坪石段不断向东北方向摆动, 沿途形成了多级基座阶地。在湿热气候条件下, 尤其是在基座上覆富含有机质的河漫滩相沉积物的“储酸池”效应作用下, 阶地基座发生了强烈的化学风化。该风化基座具有双层夷平结构, 与我国南方覆盖型岩溶的双层夷平结构在成因上具有一致性。

关键词: 阶地; 风化基座; 双层夷平作用; 坪石盆地

中图分类号: P931.1

文献标识码: A

准平原是地貌侵蚀旋回达到老年期时的地貌面, 是地壳长期相对稳定下地表被剥蚀夷平的结果^[1]。经内力抬升, 准平原演变为夷平面。夷平面的海拔反映了古地面的抬升程度, 每一级夷平面代表一个地质时代, 被地貌学界认为是最好的“地层”标志^[2]。通过夷平面及其古地貌变形的研究, 可以揭示新构造运动的特点, 了解古地貌的演化^[3], 可作为区域性乃至全球陆地抬升的指示性标志^[4]。

河流阶地包含了众多的环境信息, 反映了流域的地质构造、气候类型, 以及植被覆盖等多种环境因素的演变历史, 是地壳长期稳定、河流侧蚀拓宽后地壳又复发生抬升而遭受下切侵蚀的产物^[1], 是第四纪研究的主要信息载体之一。夷平面和河流阶地都代表着不同的地文期^[1]。

在华南热带亚热带地区, 气候环境温暖湿润, 化学风化作用异常强烈, 发育了面积广阔、类型多样的红色风化壳。许多学者从不同的角度对华南红色风

化壳进行过研究^[5-7]。红色风化壳的发育是一个由表及里逐渐深入的岩石“腐烂”过程, 年代愈老的发育在顶部, 剖面的时间序列和正常的沉积序列相反^[8]。年代分辨率较高的风化壳, 为全球性气候事件与陆相地层保存的风化记录之间的对比提供了可靠的地质档案^[9]。但是风化壳的顶层易被流水和重力作用剥蚀, 易于造成古环境信息的缺失, 而且风化壳的精确定年, 目前仍然是一个科学难点^[10]。本文报道了一种少见的埋藏型风化壳类型, 并借助夷平面、河流阶地和风化作用之间的年代和成因关系, 依据双层夷平面理论阐明阶地基座风化壳, 即风化基座的双层夷平过程。

1 研究区域自然概况

坪石盆地位于南岭山脉的南麓, 北江一级支流——武江的上游, 地理位置如图1所示, 行政上隶

收稿日期 (Received date): 2007-05-04; 改回日期 (Accepted): 2008-02-20.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40671027, 40471120) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (20040558025) 资助。[National Nature Science Foundation of China (40671027, 40471120) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20040558025)]

作者简介 (Biography): 刘昆 (1978-), 男, 陕西人, 博士研究生, 从事地貌学与第四纪研究。[Liu Kun (1978-), male, PhD student, research in the geomorphology and Quaternary geology.]

^{*} 通讯作者 (Corresponding author): eesgao@mail.sysu.edu.cn

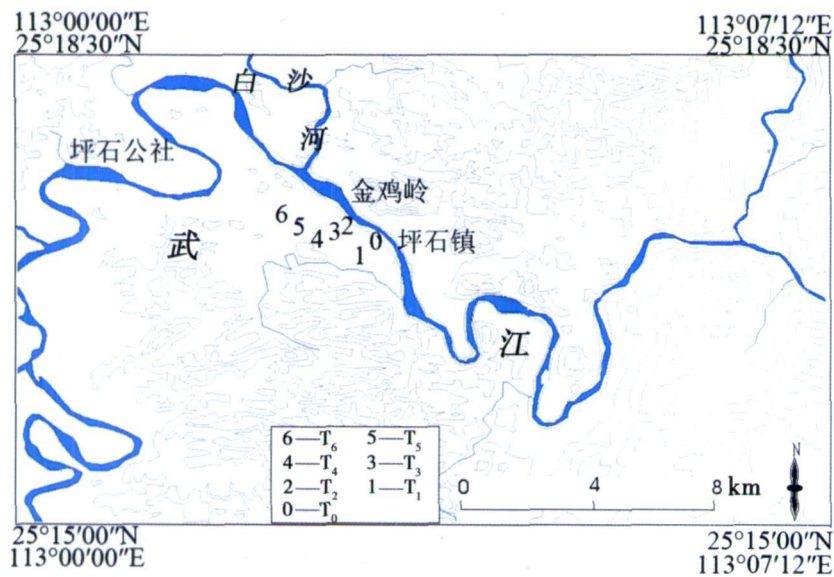


图 1 坪石盆地区域位置与阶地空间分布示意图

Fig 1 Outok of the Pingshi Basin and the distribution of the riverine tenaces

属于广东省韶关市,气候类型属亚热带季风气候,年平均气温 19.6℃,年均降雨量 1 522 mm, 研究区水热资源丰富且同期。

以断裂、断块作用为主的燕山运动和早第三纪的喜马拉雅运动,对本区的影响较大。坪石盆地在晚三叠世后期形成山间断陷盆地,盆地形态完整,与四周古老山地截然分界,受北东向的郴县-怀集大断裂控制,盆地为单斜式结构,沉积中心向一侧迁移,具有明显的不对称性。坪石盆地接受了来自周边的白垩系和第三系碎屑沉积,盆地基底为石炭-二叠系灰岩,上部为白垩系红色砂砾岩、砂页岩建造。基岩质地比较均匀,垂直节理发育,侵蚀作用沿

裂隙进行,重力崩塌显著,易于形成悬崖峭壁的丹霞地貌景观。

2 被风化的河流基座

坪石盆地共保留有 6 级阶地,均属于基座阶地(图 2)。第 6 级基座阶地上覆细粒的河漫滩相沉积物已被蚀去,仅保留下粗粒的河床相物质。1~5 级基座阶地上覆的河流相二元结构保存较为完整。虽然河床相砾石的风化程度不很明显,但阶地基座却已被强烈风化,红色泥质砂岩已经发育成不同风化程度的红色风化壳。粗大的河床相砾石与下伏的红

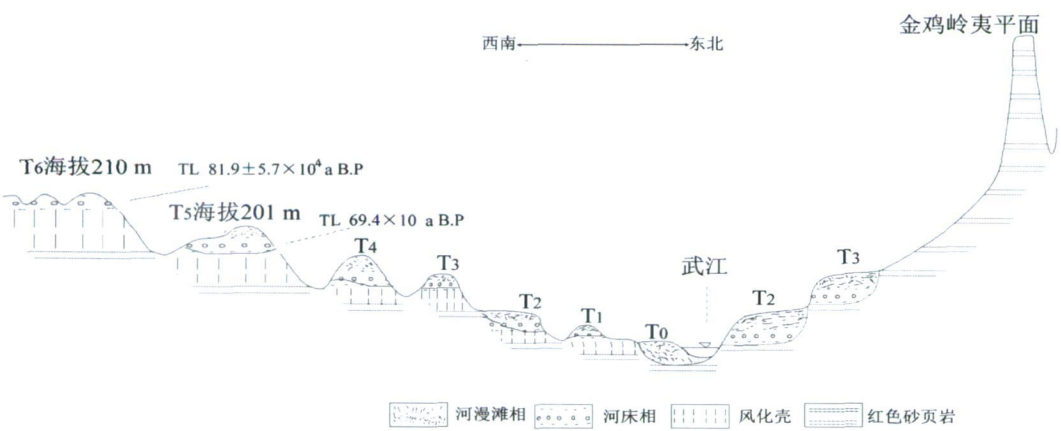


图 2 坪石盆地武江河谷地貌剖面图

色风化壳上部的细粒物质, 极易被误认为“颠倒的河漫滩相的双层结构”。红色风化壳依然保留着原岩的某些沉积结构: 层理明显, 节理、裂隙发育等。

第 6 级基座阶地的地面高程为 210 m, 河床相底部沉积物的 TL 年龄为 $81.9 \pm 5.7 \times 10^4$ a BP。

第 6 级阶地剖面为新开挖的路堑, 总长约 200 m, 主体厚度约在 10 m (图 3)。第 5 级基座阶地的地面高程为 201 m, 河床相底部沉积物的 TL 年龄为 $69.4 \pm 5.5 \times 10^4$ a BP。

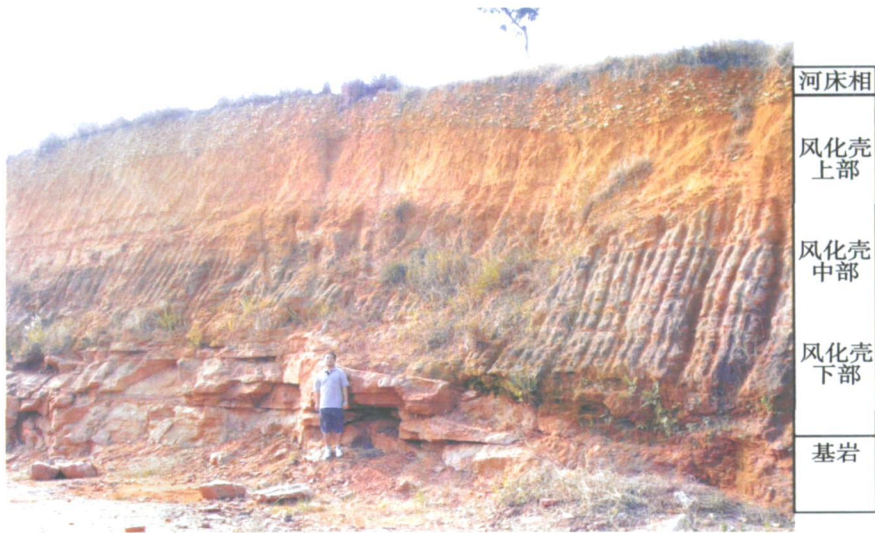


图 3 武江坪石段第 6 级基座阶地的剖面图

Fig 3 A geomorphic profile of the 6th alluvial terrace of the Wujiang River at Pingshi Basin

从第 6 级阶地基座风化壳发育程度与厚度来看, 剖面结构连续完整, 并发育强烈, 是一个典型的华南地区河流阶地基座风化壳剖面。其各层次界限清晰, 由上而下可划分为三个大的层次: 河床相砾石沉积层、基座风化壳层和基岩层。河床相沉积层中砾石之外的物质呈棕黄色, 为含砂的粉砂质粘土。砾径在 5~10 cm 之间, 砾石多已受到不同程度的风化。抗风化能力弱的砾石表面已经有高岭石形成, 抗风化能力强的砾石也已产生了风化晕圈。河床相沉积层中有透镜体构造。

基座风化壳层总体呈现红褐色, 根据质地和颜色特征可以相对划分为 3 层: 风化壳上部, 颜色呈深红褐色, 砂质粉砂-粘土, 以粘土为主, 土壤粘性强, 若表层出露, 则土质疏松, 未出露的部位土质紧实、坚硬, 与河床相沉积层之间界线分明; 风化壳中部, 颜色呈褐红色, 粉砂质-粘土, 土壤粘性较强; 风化壳下部, 颜色呈褐色, 含粘土的砂质粉砂, 接近基岩部位, 质地坚硬致密, 富含原岩碎屑。基岩为泥质砂岩, 层理特征明显, 路堑剖面的基岩略呈现穹隆状构造, 中心部位稍隆起, 节理和裂隙较两侧更为发育,

基座风化壳发育深厚, 致使路堑剖面的中间段基岩未出露。

3 讨论

3.1 第 6 级基座阶地与金鸡岭夷平面的比较

早在上个世纪 40 年代, 吴尚时先生就曾对此地进行考察, 根据武江及其支流白沙河的河道, 判定白沙河和武江都流行在一个准平原面上。就武江在坪石盆地内的“之”字形形态, 他认为是受到岩层倾向和 NW-SE 向断层影响, 该段河谷为先成河谷。NW-SE 断层的存在, 造成武江在该段河流两侧砂岩高原不能相接, 岩层走向和山脉走向不连续的现象, 但断层形成时间可能在粤北最古老的夷平面之前^[11]。而陈国达先生认为武江是河流在冲积平原上自由弯曲发展的结果, 受到后期抬升, 使河流一面向下深切, 一面侧蚀凹岸, 使河流曲率不断增大。其河谷的近直线形与该地区岩层的垂向节理有关^[12]。两位学者都认为这段河流在最近的夷平面抬升前, 两岸同处于一个准平原面上。

金鸡岭夷平面的海拔高度为 356 m, 拔河高度 206 m, 按照张珂等对粤北现存夷平面的高度划分^[13], 应属于英德面, 形成于第四纪。但刘尚仁认为高度超过 200 m 以上的夷平面应在第三纪形成^[14]。黄进对金鸡岭夷平面的地貌年龄测算结果为 313.0×10^4 a BP^[15]。根据上文所述理由, 金鸡岭夷平面所削切地层在武江两岸应一致, 两岸的高度应相近或相同, 而现在两者高差约在 150 m。

第 6 级基座阶地的河床相砾石为下更新统, TL 年龄为 $81.9 \pm 5.7 \times 10^4$ a BP。黄进^[15]估算金鸡岭的平均抬升速率为 0.066 m/ka 用黄进^[15]文中的公式对第 6 级阶地的抬升速率进行估算, 为 0.073 3 m/ka。采用同样的方法对第 5 级基座阶地进行验证, 其值为 0.073 5 m/ka 非常接近第 6 级阶地。显然, 阶地所在的台地地区的抬升速率大于金鸡岭夷平面的抬升速率。使用第 6 级基座阶地的抬升速率, 对本区与金鸡岭夷平面相同时代的古地面(准平原)进行恢复, 假设不存在地表剥蚀, 经历 313.0×10^4 a 的抬升, 该夷平面在西南岸的高度应该在 379 m, 比金鸡岭夷平面高 23 m。该结果说明在准平原时期, 古地面具有西南高、东北低的地势特征, 与陈国达先生对本区新华夏系构造地层一翼的特征是吻合的^[12]。

快速的抬升必然引起相应的风化与剥蚀, 必然会使地面的海拔降低。东北岸金鸡岭夷平面顶部以抗风化能力强的厚层砾岩为主, 该区流水作用以沿节理的垂直下渗为主, 沿地层横向运动影响微末, 因此以夷平面的形式部分地保留下来; 而西南岸台地区在强烈抬升的同时, 顶部的厚层砾岩受到以武江为主的流水作用的剥蚀(包括下切侵蚀和侧向侵蚀), 使下层的抗风化能力弱的砂页岩暴露出地表。抗风化能力弱的砂页岩, 在气下更易被风化侵蚀。White 等^[16]对波多黎各的 Luquib 山地风化壳研究得出, 在湿热的亚热带地区, 抗风化能力强的花岗岩的风化速率为 58 m/Ma 对抗风化能力弱的砂页岩来说, 风化速率应该更快。在碳酸盐岩地区, 岩溶风化壳发育需要消耗巨厚的碳酸盐地层^[17], 韦启蹯^[18]认为红色石灰土发育过程中土壤与原岩的体积比为 1:627, 而袁道先^[19]认为土层与原岩厚度之比为 1/25。坪石丹霞地层中含可溶性碳酸盐的比例达 30% 以上^[20], 其厚度的缩减, 即高度的降低, 虽不如灰岩地区强烈, 但是也会造成海拔在一定程度上降低。在上述原因共同影响下, 西南岸第 6

级阶地地面高度比金鸡岭夷平面的高度降低近 150 m。

可以推测, 距今 81.9×10^4 a 以前, 第 6 级基座阶地刚抬升出水面, 金鸡岭夷平面当时的高度为 302 m。第 6 级基座阶地当时还是第 1 级阶地, 拔河高度与现代第 1 级基座阶地相当, 第 6 级基座阶地之上应还有已经抬升出水面的更多级的基座阶地存在。随着后期地壳抬升, 更高级的基座阶地逐渐夷平, 第 6 级阶地成为现在最高级的阶地。金鸡岭夷平面则因免受侧向的流水侵蚀作用, 而得以不断抬升, 以至达到目前的高度。

覆盖了河流冲积物质的基岩, 随着构造运动抬升出地面。河流冲积物尤其是其中的河漫滩相为来自流域地表的细粒物质, 富含有机质, 易于发育成肥沃的土壤。含有大量酸性物质(包括有机酸和溶解的 CO_2)的地下水对阶地基座进行强烈的化学风化。以河漫滩相细粒沉积物为母质发育的沃土成为其下阶地基座的“储酸池”, 源源不断地向基岩风化前锋提供侵蚀介质, 从而造成基座下发育了深厚的红色风化壳。虽然我们在野外没能观察到第 6 级阶地的河漫滩相物质, 但我们根据上文的论述可知, 该级阶地的河漫滩已经被剥蚀掉, 其下的风化壳仍在发育, 这是一种少见的化学风化类型和风化壳。

3.2 风化基座的双层夷平结构

Budel 研究了干湿季节交替明显的热带稀疏草原气候下的花岗岩的化学风化过程, 提出了“双层夷平面”理论。该理论认为, 在热带气候条件下, 基岩风化形成深厚的红色风化壳, 风化壳上部暴露于气下, 构成松散物质的冲刷面, 红色风化壳被剥蚀, 地面夷平; 风化壳下部是一个与基岩接触的基面, 是风化作用的下限或强烈化学风化的锋面^[21], 风化锋面最终发育成刻蚀面^[22]。

在热带亚热带气候条件下形成深厚的风化层, 一旦该区抬升, 夷平面(特别是上部风化层)就将破坏^[23]。第 6 级阶地的风化基座“双面”是发育在与金鸡岭夷平面同期产生、被完全侵蚀的古地面(准平原)出露新鲜基岩的基础上的“双面”, 是金鸡岭夷平面解体后, 再次向新的刻蚀平原形成过程中, 发育的双面结构。这个双面结构是覆盖有河流冲积物的新鲜基岩被抬升出水面之前, 由上至下开始进行化学风化的“双面”, 形成了自下更新世以来连续风化的双层夷平结构。这种双层夷平结构不是对双层夷平面概念与形态的简单复制, 其从形态特征、发育

机制、发育阶段和区域分布等多方面有别于花岗岩地区和灰岩地区的双层夷平面, 与灰岩区的岩溶双层夷平面较为接近。

从形态特征上而言, 在基座阶地基岩向基座风化壳转变的过程中, 河流冲积层起着重要的作用。河床相冲积物的存在, 延缓了对基座风化壳顶部的侵蚀, 并加速了对风化锋面的向下推进。河流相冲积物使河流基座阶地剖面上存在 3 个近似平行的地貌面: 基座上部的河床相沉积层顶面, 中部的基座风化壳顶面和风化锋面。根据崔之久对夷平面的划分标准^[23], 基座上部的河床相沉积层顶面相当于剥蚀面, 中部的基座风化壳顶面相当于埋藏面。如果不考虑河流冲积物盖层对风化基座成因的影响, 那么埋藏的基座顶部和风化基面就形成了所谓的“双面”。这个“双面”是 Budel 在花岗岩区^[21]和崔之久在灰岩区^[24]提出的“双面”, 不存在覆盖层, 完全是岩石自上而下风化的“双面”。

从发育机制对比来而言, 岩溶区的风化以溶蚀作用为主, 刘尚仁认为广东的丹霞红层以溶蚀为主的岩溶, 也有溶蚀、潜蚀共同作用的岩溶^[25]。第 6 级阶地的基岩是砂页岩, 是一种泥沙与石灰岩物质相互胶结的岩石, 在风化、侵蚀的过程中, 易溶物质流失, 而残余物质体积缩小。这个机制与岩溶双层夷平面相同, 但物质流失量和体积缩小量, 不如灰岩强烈。这两种地层的风化作用均发生在土下, 剥蚀发生在气下, 且土下的风化也是连续风化, 这和岩溶区的双层夷平面的发育机制也是吻合的。

从发育阶段而言, Budel 在研究印度德干高原东坡面向 Coromandel 的海岸地带时, 指出介于班加罗尔高原和 Tamilnad 平原之间的过渡带上, 存在一个前中新世的“化石基岩夷平面”, 代表由构造抬升和深切冲刷暴露的双层夷平面中的风化基面; 而低的 Tamilnad 平原则是一个具有双层夷平面性质正在发育的夷平面^[26]。统一的夷平面在中新世后逐渐解体, 由于抬升幅度不同, 基岩性质差异, 各地区表现也有很大差异。青藏高原的岩溶夷平面停止发育, 云贵高原继承性岩溶作用非常微弱, 湘桂地区覆盖型岩溶可能受到岩溶地貌旋回的叠加, 表现出明显的继承性^[27]。由粤北发育了四级夷平面和第 6 级阶地的基岩双层夷平面结构的事实不难推断出, 粤北地区具有地貌的多期旋回的特征, 存在着夷平面继承性发育。

Budel 的双层夷平面最终发展为刻蚀平原。在

这个过程中, 冲刷与风化是一个动态的平衡。金鸡岭夷平面被抬高到现在的高度, 河流对其夷平的可能性已经不存在, 金鸡岭夷平面现在已经达到了地貌的稳定状态; 而由第 6 级阶地基座上的河漫滩相沉积物被蚀去的事实来看, 台地区正在向刻蚀平原发展。我们可以预见不久的将来, 在气候改变或地壳运动干扰情况下, 第 6 级阶地的河床相沉积物也将被不断地风化侵蚀掉, 最终使埋藏的基座风化壳顶面暴露在气下, 进行新一轮双层风化。冯金良认为在这个时期, 地表侵蚀才开始影响未改变 (风化) 的岩石。同时, 加速侵蚀引起风化壳 (及腐岩) 的剥离及风化基面的暴露^[28]。风化壳厚度不断变小, 直至风化基面上不规则的微地貌形态暴露出来, 最终发展成为刻蚀平原。由此可以看出, 现在的埋藏面和风化基面所构成的双面结构是剥蚀面与风化基面所构成双面结构的后期阶段, 两者最终都将解体, 发展成为刻蚀平原, 刻蚀平原应是本区地貌的最终形态。现在第 6 级阶地的基座风化壳所反映的是老夷平面解体后, 地表再次向刻蚀平原发育的过程中的一个阶段。

从区域分布上而言, 崔之久等在对青藏高原、云贵高原及湘桂丘陵一线的覆盖型岩溶及红色风化壳的研究表明, 上述地区的覆盖型岩溶和红色风化壳具有良好的一致性, 均是岩溶双层夷平面的组成部分。只是处于不同的夷平面分化阶段^[24]。该研究有力的支持了 Budel 的双层夷平面理论, 启发人们认识到地貌是可在地下发育的^[23]。西南地区夷平面的红色风化壳主要特征指标不仅反映出形成环境的相似, 而且还体现了一个统一的岩溶双层夷平面^[24]。坪石盆地处于湘桂丘陵的外围, 盆地沉积了周边灰岩地区搬运的沉积物, 沉积物中碳酸盐含量较高, 物质构成与灰岩区相近, 华南地区化学风化环境比西南地区强烈, 第 6 级阶地的基座风化壳中 < 0.002 mm 粘土占总量的 50% 左右, 硅铝比值为 2.19, 实验数据也说明相似性。采用文献 [24] 中的数据制图, 如图 4 所示, 从青藏高原→云贵高原→湘桂丘陵→粤北坪石, 随着夷平面的高度不断降低, 硅铝比值也不断减小, 整体上构成了一个由西向东风化强度不断加强的变化序列。粤北坪石处在该变化趋势线上, 符合了由西向东风化减弱的规律。这至少表明第 6 级阶地的基座风化壳与灰岩红色风化壳具有相近的风化特征和风化环境。作者认为渐新世前, 华南地区的夷平面与青藏高原夷平面、西南地区

夷平面构成了一个大范围的跨流域夷平面。自渐新世以来,随着大范围夷平面解体,粤北发育了四级夷平面^[13],青藏高原发育两级夷平面^[29],云贵与湘桂发育多级夷平面^[30-31]。这反映了外动力对夷平面发育的影响,也反映出华南地区快速化学风化的环境。

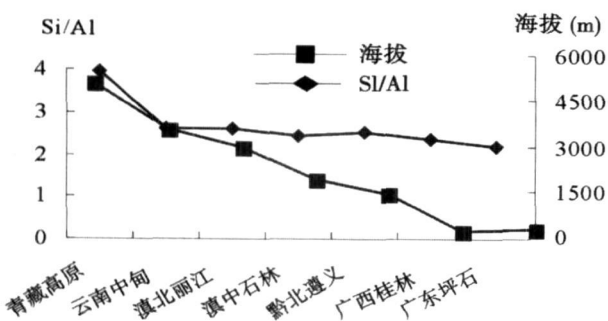


图 4 湘桂粤黔滇藏地区风化壳的 Si/Al 比值与海拔的关系

Fig 4 Relationship between the rate of Si/Al and the height in the south of China

从以上多方面说明,第 6 级阶地的基座风化壳的双层夷平结构,是一种类岩溶覆盖型双层夷平面,是一种正在发生的双层夷平面,是华南砂页岩地层区特有的类型。

3.3 双层夷平结构风化基座的地貌学意义

Budel^[21]在热带花岗岩地区提出了双层夷平面的理论,崔之久将这个理论借鉴到中国南方的岩溶地区,认为岩溶区存在双层夷平面,且覆盖型岩溶有 3 种表现形式,从青藏高原、云贵高原到湘桂丘陵一线,依次发育全裸露型、半裸露型(或半覆盖型)和未裸露型岩溶。^[24]而粤北坪石盆地接近湘桂一线的外缘地带,基座风化壳的双层夷平面形态接近覆盖型岩溶夷平面,可以认为属于未裸露型的双层夷平面(由于人工开挖而出露,正常情况下观查不到)。覆盖型岩溶夷平面虽然表现形式从东到西有很大差异,但在成因上却表现出同源性特征,即抬升运动的程度控制了覆盖型岩溶的双层夷平过程^[24]。正如黄镇国认为,中国热带长期处于持续的热湿气候,在构造运动相对稳定的时期,双层夷平面的地貌形态是否出现还值得讨论^[22]。坪石第 6 级风化基座双层夷平面的出现应该是新构造运动的结果,与覆盖型岩溶双层夷平面也可能有着成因上同源的联系。从红色基座风化壳的特征和区域的联系上来看,沉积的红色泥质砂岩也有双层夷平面的结构发育。而

在华南湿热环境下,是否能最终形成刻蚀平原,则要受到基岩性质与构造运动的控制。

Budel提出的双层夷平面理论使用在不同气候带间,揭示了从热带到热带以外,花岗岩风化壳的双层夷平面发育变化模式,崔之久等将双层夷平面理论应用到同一纬度,揭示了不同海拔的岩溶双层夷平面发育变化模式。但在热带湿热条件下,其他岩性基岩是否也可发育双层夷平面,还未见报道。李德文^[27]指出在海拔较低的湘桂地区,覆盖型岩溶可能受到岩溶地貌旋回的叠加,表现出明显的继承性,但没有对这种继承性的特征进行足够的说明。坪石盆地出现这种夷平面与阶地在两岸分布的现象,可能解释了这种地貌旋回叠加后的继承性。一方面,夷平面高出河流基准面 > 200 m,已不再被接受现在河流的夷平;另一方面,老夷平面解体后的一部分,受到河流的冲刷侵蚀,高度不断的降低,形成阶地地貌,这实际上就是向新的刻蚀平原发育。这两种地貌形态的组合,不但充分体现了地貌旋回叠加后,所表现出来的继承性,而且也证明了第 6 级阶地的基座风化壳是双层夷平面。

4 结论

发育武江坪石第 6 级基座阶地的古地面与金鸡岭夷平面属于同期的准平原,但目前两者却有不同地貌表现。这主要是因为两者分别受到了流水作用为主的外营力和构造运动为主的内营力的改造。虽然河流阶地所在的台地区的地壳抬升速率略高于金鸡岭夷平面的地壳抬升速率,但流水作用在 6 级阶地所在的台地区仍是主要的;而金鸡岭夷平面则由于缺乏流水的侧向破坏而得以保存。流水的堆积作用对风化基座的发育有重要影响。红色风化基座具备了双层夷平结构,表明在泥质砂岩地区也存在双层夷平过程,是一种特殊的双层夷平面。红色基座风化壳的双层夷平结构和 Budel研究的花岗岩区、崔之久研究的岩溶区在成因上是一致的,都是在热带亚热带气候下发育的。这可能意味着在热带亚热带气候下,双层夷平结构可以在任何岩性的地区发育,但是双层夷平结构是双层夷平面发育的一个阶段还是最终的形态,将还需要寻找新的证据深入研究。

致谢:文中的部分 TL 年代测试由中山大学物理学院的唐强副教授完成,谨致谢忱。

参考文献 (References)

- [1] Pan Baotian, Li Jijun, Cao Jixiu, *et al.* The landform in the middle reaches of the Yellow River and problem of physiographic stage [J]. *Journal of Lanzhou University (Nature science)*, 1994, 30(1): 115 ~ 123 [潘保田, 李吉均, 曹继秀, 等 . 黄河中游的地貌与地文问题 [J]. 兰州大学学报, 1994, 30(1): 115~ 123]
- [2] Davis W M. The peneplain [M]. *Geographic Essays* [M]. Boston: Ginn and Co., 1898 (rev. 1909): 350~ 380
- [3] Feng Jinliang, Cui Zhijiu. The reconstruction of fossil planation surface in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47 (5): 434~ 440
- [4] Shackleton R M, Chang C F. Cenozoic uplift and deformation of the Tibet Plateau: the geomorphological evidence [A]. In: Chang C F. *The Geological Evolution of the Tibet Plateau* (In Chinese) [C]. Beijing: Science Press, 1990: 372~ 383
- [5] Zhu Zhaoyu, Zheng Honghan, Zhang Guomei, *et al.* The developmental stages of red soils and their weathering minerals in the tropics of south China [J]. *Quaternary Sciences*, 1991, 11(1): 18~ 27 [朱照宇, 郑洪汉, 张国梅, 等 . 华南热带红土期及风化矿物初步研究 [J]. 第四纪研究, 1991, 11(1): 18~ 27]
- [6] Xu Yifang, Zhu Zhaoyu, Wen Gaoguo, *et al.* Geochemistry and soil forming environment of the red soil section in the southern Leizhou Peninsula, Guangdong Province [J]. *Geochimica*, 2000, 29(4): 402 ~ 409 [徐义芳, 朱照宇, 文高国, 等 . 雷州半岛南部若干红土剖面的地球化学与成土环境研究 [J]. 地球化学, 2000, 29(4): 402 ~ 409]
- [7] Xu Yifang, Zhu Zhaoyu, Wen Qizhong, *et al.* Clay mineral chemical characteristics and environment record of the multi-stage laterite at Yingfengling Section, Leizhou Peninsula [J]. *Geochimica*, 1999, 28(3): 281~ 289 [徐义芳, 朱照宇, 文启忠, 等 . 英峰岭剖面红土的粘土矿物和化学特征与成土环境关系 [J]. 地球化学, 1999, 28(3): 281~ 289]
- [8] Feng Zhigang, Wang Shijie. Problems in the paleoenvironmental reconstruction of laterite in south China [J]. *Journal of Mountain Research*, 2003, 21(6): 641~ 646 [冯志刚, 王世杰 . 中国南方红土古环境重建中存在的几个问题 [J]. 山地学报, 2003, 21(6): 641 ~ 646]
- [9] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian. Present situation and prospects of researches on weathering crust [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(3): 283~ 288 [李德文, 崔之久, 刘耕年 . 风化壳研究的现状与展望 [J]. 地球学报, 2002, 23(3): 283~ 288]
- [10] Sun Chengxing, Wang Shijie, Liu Xiuming, *et al.* Review on the dating of weathering profiles [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19(1): 54~ 59 [孙承兴, 王世杰, 刘秀明, 等 . 风化壳剖面的定年研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(1): 54~ 59]
- [11] Wu Shangshi, Zeng Zhaoxuan. Erosional surface and transverse valley in the north of Guangdong Province [A]. In: *The data of Geomorphology in the South of China* [C]. 1980: 55~ 56 [吴尚时, 曾昭璇 . 粤北侵蚀面及横谷 [A]. 见: 华南地貌学资料 [C]. 1980: 55~ 56]
- [12] Chen Guoda. The meander of the Wujiang River in the Pingshi Basin of north of Guangdong [J]. *Geography (Institute of Geography)*, 1943, 3(3~ 4): 39~ 42 [陈国达 . 粤北坪石附近之武水河曲 [J]. 中国地理研究所, 地理第三卷第 3~ 4 期合刊, 1943, 3(3~ 4): 39~ 42]
- [13] Zhang Ke, Huang Yukun. Researches on the planation surface in the north Guangdong [J]. *Tropical Geography*, 1995, 15(4): 296 ~ 305 [张珂, 黄玉昆 . 粤北地区夷平面的初步研究 [J]. 热带地理, 1995, 15(4): 296~ 305]
- [14] Liu Shangren. Valley landform in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1997, 36(1): 89 ~ 94 [刘尚仁 . 广东河谷地貌 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 1997, 36(1): 89~ 94]
- [15] Huang Jin. Quantitative survey of several important issues concerning the formation of the Danxia landform [J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(2): 127~ 130 [黄进 . 丹霞地貌发育几个重要问题的定量测算 [J]. 热带地理, 2004, 24(2): 127~ 130]
- [16] A. F. White, A. E. Blum, M. S. Schulz, *et al.* Chemical weathering in tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: I. Long-term versus short-term weathering fluxes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 209~ 226
- [17] Li Dewen, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, *et al.* Formation and evolution of Karst weathering crust on limestone and its cyclic significance [J]. *Carsologica Sinica*, 2001(3): 183~ 188 [李德文, 崔之久, 刘耕年, 等 . 岩溶风化壳形成演化及其循环意义 [J]. 中国岩溶, 2001(3): 183~ 188]
- [18] Wei Qifan, Chen Hongzhaq, Wu Zhidong, *et al.* The geochemical characteristics of limestone soils in Longgang area, Guangxi [J]. *Acta Palaeologica Sinica*, 1983, 20(1): 30~ 41 [韦启藩, 陈鸿鸣, 吴志东, 等 . 广西弄岗自然保护区石灰土的地球化学特征 [J]. 土壤学报, 1983, 20(1): 30~ 41]
- [19] Yuan Daoxian. The Karst in China [M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1994. [袁道先 . 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994]
- [20] Liang Bahe, Zhu Sulin, Chen Guoneng. Petrology analysis of Danxia landform in Jinjiling district, north Guangdong [J]. *Tropical Geography*, 1992(2): 133~ 140 [梁百和, 朱素琳, 陈国能 . 粤北金鸡岭丹霞地貌的岩石分析 [J]. 热带地理, 1992(2): 133 ~ 140]
- [21] Budel J. Double surface of leveling in the humid tropics [J]. *Zeits. Geomorph.*, 1957, 1(2): 223~ 225
- [22] Huang Zhenguang, Zhang Wei-qiang. A discussion on some problems in paleoclimatic geomorphology of tropical China [J]. *Tropical Geography*, 2006, 26(3): 197~ 201 [黄镇国, 张伟强 . 中国热带气候地貌几个问题的讨论 [J]. 热带地理, 2006, 26(3): 197~ 201]
- [23] Cui ZJ, Li Dewen, Wu Yongqiu, *et al.* Comment on planation surface? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 44(22): 2017~ 2022
- [24] Cui Zhijiu, Li Dewen, Feng Jinliang, *et al.* The cover karst weathering crust and karst (double-level) planation surface [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(4): 510~ 520
- [25] Liu Shangren. Red beds Karst of Guangdong and its mechanism

- [J]. *Carsologica Sinica*, 1994(4): 395~ 403[刘尚仁. 广东的红层岩溶及其机制 [J]. 中国岩溶, 1994(4): 395~ 403]
- [26] Budel The Relief types of the sheetwash zone of Southern India on the eastern slope of the Deccan High land toward Madras [J]. *Colloquium in Geographiam*, 1965, 8: 25~ 33
- [27] Li D ewen Cui Zhijiu, Liu G engnian. Feature and origin of covered Karst on Hunan, Guangxi, Guizhou, Yunnan and Tibet[J]. *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[J]. 山地学报, 2000, 18(4): 289~ 295]
- [28] Feng Jinliang Cui Zhijiu, Zhu Liping *et al*. Review on the planation surface [J]. *Journal of Mountain Research*, 2005, 23(1): 1~ 13[冯金良, 崔之久, 朱立平, 等. 夷平面研究评述 [J]. 山地学报, 2005, 23(1): 1~ 13]
- [29] Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu G engnian, *et al*. The planation surface, paleo-karst and the uplift of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 378~ 385[崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升 [J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 378~ 385]
- [30] Ming Qingzhong Pan Yujun. The elementary acknowledge on the importance of environmental evolution of Yunnan Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 2002, 8(4): 361~ 368[明庆忠, 潘玉君. 对云南高原环境演化研究的重要性及环境演变的初步认识 [J]. 地质力学学报, 2002, 8(4): 361~ 368]
- [31] Chen Jiangeng First class waterfall of Danxia in China—Shizhangdong of Chishui [J]. *Guizhou Science*, 2003, 21(4): 63~ 67[陈建庚. 中国丹霞第一瀑——赤水十丈洞 [J]. 贵州科学, 2003, 21(4): 63~ 67]

The Double Level Structure of the Weathering Terrace Base and Its Significance Example of the 6th River Terrace of Pingshi Basin in the North of Guangdong Province

LIU Kun, GAO Quanzhou, JIAO Shulin, WANG Zhengang, SHE Jianwei, DING Jian

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract Totalsix classes of rock-based alluvial terraces are discovered in the Pingshi section of the Wujiang River, North of Guangdong Province. Those rock-based alluvial terraces and the Jinjiling Planation Surface are all originated from the same peneplain that was formed in the Tertiary Period when the geomorphic processes progressed its eventual stage. The alluvial terrace is formed when the river intermittently incised into the bedrocks. Influenced by the new tectonic movement that characterized by inclined lifting, the Wujiang River at Pingshi section moved towards northeast and formed many classes of rock-based alluvial terraces on the way. Under the humid and tropical circumstance, especially with the promotion of the effect of “a pool stored the acid” of the fine alluvial sediment up to the bedrocks that is abundant in organic matter, the bedrocks are deeply chemically weathered. The weathered rock-based alluvial terrace is characterized with the double surface of leveling, which is identical in cause of formation to those developed in the karst region of the southern China.

Key words terrace, weathering terrace base, double surface of leveling, Pingshi Basin