

地貌继承性和塔状喀斯特的发育

P. W. 威廉姆斯

概述 地貌继承性的意义一般是很难评价的。在这方面，珊瑚礁地貌学家已走在其他地貌学家前面。对现代地貌从古地貌发展而来的认识，这是一个重要的问题。加柯克斯(1977)在喀斯特教科书中指出，喀斯特作用引起的“地貌变化”反过来影响该地区地貌发育过程，并使自身进一步的完善。他认为地形不仅是一系列作用过程的产物，而且是地貌演化中一个高度活跃的和直接的因素。地貌不是简单地作为反映过去过程的一面镜子，而是一个影响现代侵蚀过程和控制将来地貌的动力因素。与地貌继承性特别有关的两个因素是：侵蚀阶段和当时的气候地貌条件。作为基准面的冰期海平面变化与气候地貌的关系很复杂。如运用戴维斯的演化阶段论，一个老年期的地形包含了一个早期的壮年阶段，但是如果气候变化介入，那么地貌过程加上现代温暖气候条件，就会对以前较冷气候条件下形成的及在滨海带受较低基准面影响的景观产生作用。

戴维斯模式是不容许某些原始地面直接演化成老年型地貌的。因为按他的模式，地貌演化没有捷径，只有中断，尽管气候变迁可加速或减缓这一过程。一般来说这对喀斯特演化循环和序列模式也是正确的。例如，塔状喀斯特常常作为演化的高级阶段。一旦当侵蚀到地下水位时，喀斯特盆地的底部就不断加宽。根据这种解释，锥状喀斯特（也称灰盆喀斯特，是一种多边形喀斯特）和塔状喀斯特不仅是不同的喀斯特类型，而且是代表了单一景观类型完全不同的剥蚀阶段。

塔状喀斯特也被认为是锥状喀斯特的一个变种，它们不依赖于任何侵蚀阶段，而且有时还同时演化。弗斯塔本(1960)指出，塔状喀斯特应该是锥状喀斯特在特殊的水文环境（地下水位附近）下形成的。

喀斯特地区的溶蚀速度和空间分布也受到继承性的影响。加柯克斯(1977)认为，若气候条件一定，在相似的地形和地质条件下，早期喀斯特化地块的溶蚀作用强于非喀斯特化地块，因为前者水/石接触机会较多。处于开放系统这种特殊环境中的溶蚀剥蚀速度高于封闭系统。如钙质冰川泥构成土壤的基质，那么它的绝对溶蚀量大于相似地区的覆于石灰岩上的无钙质土壤。因此，对比溶蚀剥蚀速率和其空间分布时，除考虑地貌继承性外，还必须考虑气候和其他因素。

塔状喀斯特的实质 塔状喀斯特的类型：塔状喀斯特一般由散布在平坦地面上的碳酸盐岩残丘组成，这是众所周知的湿润的热带和亚热带地形，华南是世界上最典型的例子。中国地貌学家把平原上孤立的塔状喀斯特称为峰林景观，以区别于具有共同基座的若干残丘和在簇状山峰间常有封闭洼地分布的峰丛。可认为峰林直接是由峰丛发育而成并代表了更高级的溶蚀阶段。

“塔”这个术语不严格地用来指那些陡峭的、柱状的、其他部分近于半球形的山体。由于岩层产状、下切和气候因素等的影响，塔体可以是不对称的。

“塔状喀斯特”包括许多不同的地形。福特和威廉姆斯提出了四种主要组合成因类型景观（图1）：1.突出在冲积物覆盖的碳酸盐岩平坦地面的残丘。2.非碳酸盐岩受到强烈蚀切的、

碳酸盐岩夹层突出于平坦地面构成的残丘。3.突出在埋藏下部喀斯特地形的碎屑沉积物加积地面上的碳酸盐岩丘。4.矗立在坡陡的不同岩性基座上的孤立碳酸盐岩塔。

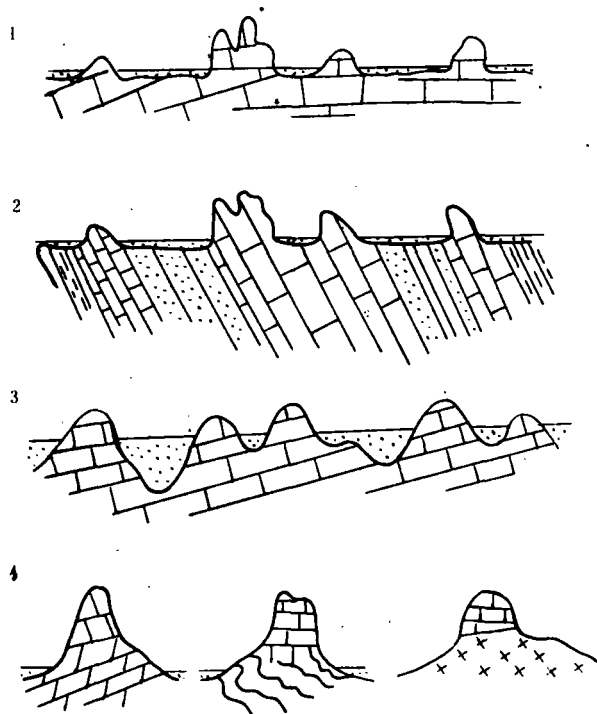


图1 四种塔状喀斯特的成因类型

1. 平原化石灰岩地表上的残丘；
2. 石灰岩夹层突起形成的残丘；
3. 突出在冲积物地表的残丘；
4. 矗立在坡陡的不同岩性上的塔

本文主要讨论景观组合最典型的第一种类型。一般有冲积物覆盖的丘间平地（有时为基岩）可呈阶地状。它可延展到非碳酸盐岩层。

第一种类型塔状喀斯特的发育：喀斯特的发育强烈地受水文地质条件，特别受喀斯特化岩石与其周围非喀斯特化岩石间关系的影响。这决定了是内源扩散流补给还是集中外源补给对地形侵蚀的影响最重要。

袁(1985)解释了塔状喀斯特演化和两个极端的可能性：1.在有利的岩性、地形和气候环境下，塔状喀斯特地貌演化并不依赖于前期地貌；2.塔状喀斯特的几何形态明显地依赖于先前地形，如继承峰丛的地貌特征。但是当超量侵蚀时，就逐渐变得与继承性无关了。现有的证据指出这两种都存在，但是第二种更普遍。

在季节性湿润热带的澳大利亚西北部和加拿大北部亚极地的纳哈尼山区的喀斯特是第一种喀斯特演化类型的例子。这些地区喀斯特的发育强烈地受构造控制，尤其是致密块状石灰岩受主裂隙组的影响。

澳大利亚西北部石灰岩山区，虽然一些外源河流经喀斯特，但主要为内源补给。雨水直接落在切过石灰岩的上升了的侵蚀面上。詹宁斯和斯维延提出一个从棱角的溶蚀到节理扩大为“巨大灰岩深沟”的演化序列，节理控制着孤立地插入高地和谷边形成岩墙的“盒状谷”，并使挺立在准平原上的塔坡更陡，以致在低处但不是原始地面处剥去了构造。这个大灰岩沟

有几百米长，深33米和3米宽。尽管绝大多数塔体较小，但最高可达45米。威廉姆斯(1978)认为这种地貌成因模式同样适用于澳大利亚北部的其他半干旱喀斯特地区。

在纳哈尼，虽然气候条件（或历史）和水文地质环境有明显的差异，但奇怪的是地貌演化过程十分相似。最初完全接受来自上覆不透水页岩露头区的外源水补给，并使水难以流入下面节理发育的石灰岩。石灰岩的盖层被剥去的地方，现在为降水直接补给。勃洛克和福特(1978)认为那些节理已溶蚀扩大成深达185米和长9公里峡谷的“凹槽”。平面为多边和底部有冲积层的封闭洼地发育在节理的交点和形成了孤立的迷宫通道体。狭缝和洼地的不断扩大（有些发育成坡立谷），使洼地间的地块不断后退逐渐成高125米的陡坡残塔。象溶蚀作用一样，冻融作用也能使斜坡后退。因此，塔体直立在塔脚周围较陡的碎石裙上。这与澳大利亚西北部在壮观的多边基岩山麓平原上挺立塔体形成明显的对比。詹宁斯(1981)强调，这两种景观显著不同，与石灰岩山区相比，特别是纳哈尼没有山麓平原，具有极少的塔丘。

纳哈尼塔丘间的平坦地面更可能是碎屑沉积和冲积的产物而不是岩质夷平的。所以它们明显地不同于图1的模式。演化速度也有一个数量级的差别。约20万年前的上次冰期以后，整个纳哈尼的地貌已经发育，然而地貌学家认为，澳大利亚西北部地貌发育于晚第三纪以后。尽管如此，它们仍然强烈地保持着地形的类似性。

湿润的印尼苏拉威西南部塔状喀斯特也与前面两个例子有某些相同之处。麦克唐纳尔德(1976)讨论了这里的地形明显地受主要共轭节理构造的控制，其侵蚀扩大的线型洼地长8公里，深50—200米和6—400米宽。它切过了石灰岩高原的边缘陡崖，并称为纳哈尼“峡谷”。来自附近上覆岩石（假若是火山岩）的外源河流经这些相连的、有时为地下河的通道，可测直径1—10公里和海拔564米的高原进一步切割形成了冲积平原上陡峭的石灰岩塔群。主节理和外源河相结合强烈地控制了塔状喀斯特地形。有一种假说认为溶蚀平原下伏在塔之间的冲积低地之下，但又不象马来西亚肯太谷地，但迄今尚无这种证据。

有些作者倾向于锥状和塔状喀斯特可以同时并列产生，而不考虑地貌继承性。例如，弗斯塔本(1960)在爪哇发现高原顶部有一种有序普通锥状喀斯特。巴拉茨(1968)在印尼其他地区的调查支持上述观点。他说，喀斯特锥和塔体的形成代表了相同的热带剥蚀过程的瞬间状态。他坚持认为它们的形成不受时代的控制，当低锥状地貌发育时，坚硬致密厚层石灰岩有利于塔的发育，除非它们已接近基准面。

然而，当锥状和塔状喀斯特紧密分布在一起时，它们的空间关系很好地说明有一个序次解释——塔状喀斯特是由锥状喀斯特发育来的，即前面讲的第二个演化过程。在这种情况下，可以认为当多边形喀斯特向下溶蚀到地下水位时，垂直深切作用就停止。锥状和半球状等残丘围绕着石灰岩盆地间地形分界分布，然后因连结它们的坳口逐渐被溶蚀掉而就地孤立。这些“塔”的位置直接决定于多边形喀斯特的分水岭位置，它们的形状、大小及坡度直接由多边形“蛋盒形”石灰岩坑间小山的形态所决定。特别它们受到外源河流的冲蚀和深沟包围时，就会出现局部下切和塔变陡。然而，这种解释还值得商讨。最近的研究成果指出侧向溶蚀作用对塔体发育的影响小于莱蒙等人最早的认识。无疑有时下切作用加陡了塔坡，但塔体主要继承了多边形喀斯特残锥的形状。特亚(1969)认为石灰岩软弱面的空间位置通过它对垂向和侧向溶蚀作用比率的影响来控制山坡角。戴(1981a)也强调这是塔陡坡发育的关键因素。

似乎首先在喀斯特地貌的边缘部分，峰丛喀斯特蚀低到地下水位。根据水文地质和地形条件，最可能在溢流带最先蚀低到地下水位，但在入流处同样也可出现。前者发现在巴西息本，后者是中国的桂林地区。波多黎各的塔状喀斯特或“灰岩残丘”带也分布在流出带，而

且也可能在它发育后又遭到了抬升。灰岩残丘之间砂层覆盖下的石灰岩表层硬化壳的发现,说明碎屑盖层很可能是塔形成后海岸带流水侵入时形成的。因此,最早认为灰岩残丘是在砂层覆盖下发育的想法是错误的。

袁讨论了桂林附近峰林(塔状的)和峰丛的空洞分布,认为塔状喀斯特主要出现在地表径流分布区,而峰丛主要发育在缺少或没有地表径流的地区。地表流产生于:(a)源于邻近非喀斯特地区较大外源径流区;(b)碳酸盐岩系中喀斯特水系很不发育的地方;(c)碳酸盐岩上覆盖的相对不透水碎屑沉积物阻隔渗流的地方。外源水流入越多,喀斯特塔分布越广泛。在上述各种情况下,地貌都接近地下水位发育。袁断言塔主要是地表水流作用的结果,而峰丛主要发育在地表水作用弱或不重要的地区。它们的发育进而与地质环境有关。塔状喀斯特不代表演化中的某一阶段,而峰丛喀斯特不必是它们最初的阶段。因此,峰林和峰丛是平行发育而无演化序列。

袁已弄清了这些地形发育的环境和条件,但它们发育的真正机制还不清楚。对发育过程的不断探索就会得出更综合更合理的解释。峰丛分布在地下水位低于封闭洼地底部和垂向排水及灰盆强烈下切的地方。但当洼地蚀到饱水带时,就到达了重要作用过程的临界,并且变为侧向排水为主。峰丛地形就地蚀低成准平原上的残留物。桂林附近它们首先分布在地下水埋深浅的外源水补给带。但是象在漓江峡谷两岸渗流层很厚的地方,峰丛很发育。桂林西部的峰丛“岛屿”是前期广泛分布的多边形喀斯特的残余。而在大圩和阳溯间南部平行河流的多边形喀斯特是由峡谷下切峰林回春形成的。峰丛区小片塔状喀斯特也往往发育在受下伏不透水岩石强烈控制造成的地下水位埋深浅的地方。

如果地下水埋藏很深,多边形喀斯特能无限期地维持。但当地下水位变浅时,就很快让位给塔状喀斯特。这就解释了为什么塔状喀斯特和峰丛能紧密相邻地分布在一起。从峰丛山区俯视,可见塔体矗立在冲积谷底上。峰林继承了峰丛,因此它仍是演化序列中一个较老的阶段。但在剥蚀速度接近但渗流带厚度明显不同的相邻喀斯特地区,地下水位浅的喀斯特区塔状喀斯特出现的时间要比邻区多边形喀斯特结束的时间要早得多。

这些喀斯特类型的内在成因联系最好用它们之间存在的两种发育特征来说明。当侵蚀过程达到基准面时,由峰丛发育成峰林,而喀斯特回春时,塔状喀斯特又演化成峰丛。在回春作用过程中,残丘连结起来成为多边形喀斯特地貌向心灰盆间的分水岭这种地貌演化出现在贵州高原龙宫附近地貌回春的边缘区。在漓江峡谷沿岸同样也有分布。

这种塔状喀斯特演化序列是一个较长的地貌发育阶段。因为多边形喀斯特残丘要逐渐变为孤丘。该发育过程中,地形下蚀切过一系列水文带的岩层。在塔状喀斯特区洞穴中能找到发育阶段的特征和时间的证据,桂林的演化历史证明了这一点。

亚热带塔状喀斯特发育的探讨 桂林城外的穿山是由具有同一古生界厚层碳酸盐岩基座的五个山峰组成。它是漓江泛滥平原上的孤立塔丛。很明显,它们没有受大圩下游峡谷下切波的影响。最西边的一个山峰突然高出旁边河流94米。经调查,该山中有7个溶洞,最高溶洞层高出面60米,特别值得注意的是其中沉积物的古地磁研究。根据上述讨论,可得出下面初步的结论:1.高出洪积平原23米以上的洞穴沉积物的沉积时代早于布容期,可能是90万年前的贾拉米洛亚期或更早。这就与从本区各种塔状喀斯特洞穴沉积物中脊椎动物化石所得出的结论相一致。塔中高层洞穴中的化石是属于中更新世和上新世的;2.洪积平原加积和剥蚀/下切作用造成的局部沉积和剥露至少已影响到塔体的基部。其证据为:(a)洞穴中流水成因的碎屑沉积物——地下河阶地和回水沉积——目前已局部遭到再掏蚀。(b)随着水位的

下降, 水平溶蚀形态刻入了原在水位下充分发育的洞壁上; 3. 洞穴沉积物说明了洪积平原平均下降速度, 因此塔脚裸露的平均速度不超过23毫米/千年, 塔顶同时也不断被蚀低。但是塔纯增高或降低的速度是未知的。塔状喀斯特点状分布的冲积平原的降低遵循麦克唐纳尔德(1979)描述的巴西塔状喀斯特作用过程: 4. 在桂林附近发现的和本例子代表的喀斯特塔丘是逆时地形。因此任何人不能机敏的说出塔的年代。在塔顶部洞穴中的沉积物一般比那些低位洞穴中的沉积物老, 而且含有沉积物的洞穴作用更老。另一方面, 切露它们的斜坡较年轻, 在塔基露出的斜坡, 除剥露的外, 是最年轻的。图2是塔体演化的模式图。

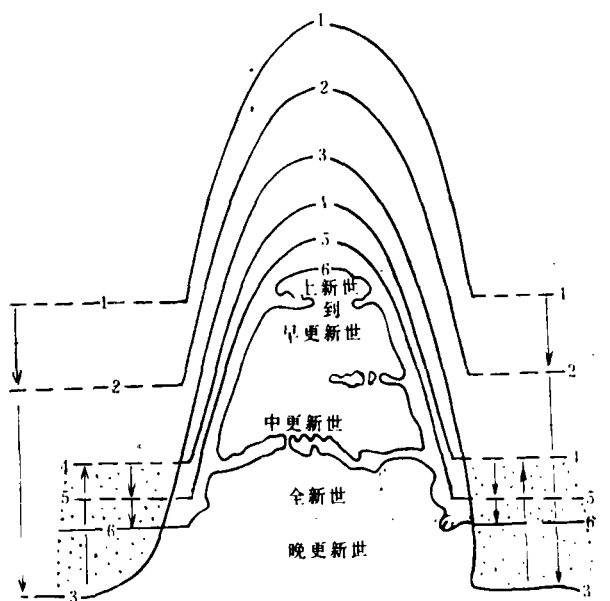


图2 桂林附近塔状喀斯特演化示意模式图

阶段1塔的形状是从前期灰盆阶段继承来的, 山峰和基部溶蚀平原的同步溶蚀使塔体渐渐降低到位置3。但其几何形状没有重大变动。因洪积平原加积而中断了塔体的发育, 塔的基部被埋藏到阶段4所示的位置。后来冲积地面剥蚀降低到位置6, 这使早期的塔体部分再次被剥露。由深沟和水平地下洞穴说明发育过程处于停滞阶段, 有一些切过早期灰盆喀斯特阶段形成的较老潜水通道。实际上, 往往有多次加积、剥蚀作用。

结论 塔状喀斯特的类型: 图1划分了成因类型不同的塔状喀斯特。第一类代表一个纯碳酸盐岩地形。并把这种真正的喀斯特地貌作为理想的模式, 尽管第二类可能分布更普遍。第二类是由不同的侵蚀作用形成的。虽然一个碳酸盐岩夹层大得足以使它们能象第一类那样演化。塔间的侵蚀地面是一个重要的地形并可蚀去碳酸盐和非碳酸盐岩。第三类是发育在冲积溶蚀平原上的第一或二类的塔状喀斯特。实际上它是局部被埋藏的锥状喀斯特。很多情况下, 第四类为混杂基岩上残留的孤立塔体, 虽然往往与溶蚀平原无关。

以前所说的纳哈尼地貌是否是一般所理解的塔状喀斯特(如类型1或2), 这是一个有争论的问题。目前缺乏塔间侵蚀地面的证据表明它们不是一般所说的塔状喀斯特。在某些方面它们更接近于美国西南部的孤山和方山地形。另一方面, 澳大利亚北部安哩姆地“毁城”的前寒武纪石英砂岩景观, 是准确无误的塔状喀斯特。

控制塔状喀斯特发育的因素 在类型1塔状喀斯特演化中有重要意义的几个因素为: 1. 渗流带厚度: 灰盆喀斯特的发育至少需要几十米厚的渗流带。所以, 如果地下水位很浅, 塔状喀斯特立即就形成。若渗流带很厚及其他因素也有利的话, 则灰盆喀斯特将无限期地存在下去; 2. 水文地质条件: 内源水促使灰盆向下发育, 而外源水则使山体加速后退并溶蚀下切斜坡; 3. 气候: 类型1和2塔状喀斯特绝大多数分布在热带到亚热带地区的事实, 必然导致如下结论: 气候强烈地控制有关的地貌成因过程。塔体分布在热带和亚热带的外围区域。象在纳哈尼, 也难否定这一点, 但是这也说明一组以上的作用过程相结合也能导致相似的地貌; 4. 基准面: 地下水位构成了喀斯特地貌的侵蚀基准面。它是喀斯特地貌演化中一个主要

城市水文学*

M. J. Hall (英国)

一、城市水文学的定义 水文学可定义为研究地球上水的一门自然科学, 它研究地球上水的流动、循环、分布; 水的物理化学性质; 以及水与环境、当然也包括与生物之间的相互关系(联合国教科文组织, 1979)。这种表述意在强调该学科的两个特点: 它的多学科性质, 涉及到物理学、化学、生物学以及各种应用科学; 它对自然界各种状态的水的空间和时间分布规律以及运动的关注。其中第二个特点在水循环概念中得到体现, 水循环概念表明了降落于陆地上的水又流归海洋的各种途径, 在海洋中, 水的蒸发又为循环的再进行提供了水气来源。

门槛。当到达基准面时, 灰盆喀斯特退位于塔状喀斯特。这门槛不是一条线而是一个地下水位波动带。

地形的相对和绝对年龄 一足够厚的渗流带和其他有利的环境下, 灰盆喀斯特代表了一个重要的发育阶段。除非它达到潜水变动带, 一般不会演化成塔状喀斯特。若地下水位明显下降, 导致门槛移动, 那么塔状喀斯特就有时间返到灰盆喀斯特。但如在塔状喀斯特阶段, 地下水位下降得很少或逐渐下降的, 则塔脚就会广泛出现。

在渗流带特别厚的地方, 灰盆喀斯特作为向下溶蚀的景观而持续几百万年。但若渗流带很薄, 它将短命的甚至可忽略。因此, 在同样一般的地区, 高地上的灰盆喀斯特比谷地中的塔状喀斯特存在的时距完全有可能更长。在此情况下, 虽然灰盆喀斯特代表早期的演化阶段, 但它可能比塔状喀斯特更老。

假如山坡平行后退, 那么下蚀塔从峰顶到峰脚的整个斜坡就可认为其年龄相同, 不受埋藏或掘蚀的干扰。而这些斜坡的几何形态可归因于灰盆喀斯特的残丘衍生形态。继承的痕迹也能以洞穴或洞穴沉积物保留下来。因此, 近塔顶的洞穴及洞穴沉积物一般比接近塔脚的要老。整个地貌可认为具有反时特征, 因为最年轻的处于或接近于它裸露的基部。

塔状喀斯特一旦明显地被抬高到它发育时的基准面带以上, 就失去了与新作用过程环境的平衡, 尽管它们在新的环境中仍遭雨水的溶蚀, 但是残存喀斯特。谷地的溯源下蚀作用使它回春到灰盆喀斯特。在这种情况下, 残存的塔状喀斯特明显地老于河谷。锡拉尔(1965)讨论了华南的这种塔状喀斯特, 并认为它们很可能是早第三纪甚至是晚白垩纪到第三纪的产物, 张之淦(1980)和任美锒寿(1982)提出的最新资料总的支持了这个结论, 并指出在西藏第三纪的塔状喀斯特可能抬高了约 3200 米。

在某些地区较老沉积物覆盖下的古喀斯特地貌剥露和复活的可能性是存在的。例如桂林, 白垩纪“红层”覆盖了发育现代地形的中生代喀斯特。这提醒我们继承性的地形可能是较老的, 并决定了地形的粗轮廓。新的地形很大程度上归因于第四纪作用过程。

刘宏、宋林华译自《Geomorphic Inheritance and the Development of Tower Karst, Earth Surface Processes and Landforms》, Vol. 12, 1987

* 因是摘译, 文中小标题顺序与原文不同——译者。