

湘桂黔滇藏一线覆盖型岩溶地貌 特征与岩溶(双层)夷平面

李德文, 崔之久, 刘耕年

(北京大学 城市与环境学系, 北京 100871)

摘 要: 根据岩溶风化壳的发育条件及研究区覆盖型岩溶特征, 提出岩溶(双层)夷平面概念, 认为研究区覆盖型岩溶是一个统一的岩溶(双层)夷平面的组成部分。其现阶段的存在形式如石林、岩墙等为后期不同程度风化—刻蚀作用的结果, 其地貌形态多为土下成因, 并随剥蚀程度、裸露时间及后期环境的差异而叠加各种后期气下改造特征。

关键词: 覆盖型岩溶; 红色风化壳; 岩溶双层夷平面; 刻蚀平原

中图分类号: P931

文献标识码: A

青藏高原覆盖型岩溶已经引起广泛的重视^[1,2], 它是可溶岩在松散覆盖层之下经溶蚀作用而形成的地貌形态。从大尺度上研究湘桂黔滇藏覆盖型岩溶, 不仅有助于古环境的系统认识与重建, 而且对认识研究区石林等地貌形态的形成、分布和演化有着重要的指导意义。同时, 红色风化壳作为覆盖型岩溶发育演化的直接产物, 在研究区也有不同程度的保留。作者将覆盖型岩溶和红色风化壳视为一体, 拟通过对湘桂丘陵、云贵高原和青藏高原东部覆盖型岩溶和红色风化壳发育演化特征的分析 and 对比, 建立一个反映覆盖型岩溶发育的岩溶双层夷平面模式, 进而讨论研究区覆盖型岩溶的剥露与刻蚀平原的形成问题。

1 覆盖型岩溶形态特征

1.1 主要的覆盖型岩溶形式

研究区覆盖型岩溶从形态和规模上大致可分为石林、岩墙、石牙等类型。其中岩墙主要见于青藏高原(如安多北山, 照片 1)¹⁾和云贵高原(如黔中丁旗), 纵向延伸较远, 墙顶有起伏, 呈锯齿状。岩石表面在青藏高原大多粗糙不平, 在云贵高原则多叠加有雨蚀痕迹。部分墙上有窗洞。相对高度 10 m~20 m, 有的更高; 石林则广泛见于青藏高原和云贵高原, 岩壁陡峭。根据石林体表面特征, 可分为剥蚀残留式和雨蚀叠加式。前者常见于青藏高原(如安多北山、甘南则叉)(照片 1), 形态浑圆或呈塔状, 沿垂直轴向对称, 高度大于根部的长轴, 基部以下有灰岩碎屑覆盖(但在碎屑之下或灰岩裂隙中常可见到红色石灰土), 相对高度 20 m~30 m。后者常见于云贵高原(如滇中路南石林、黔中丁旗)(照片 2, 3), 尖削挺拔, 顶部多为尖脊状, 基部没于红色风化壳中, 相对高度从数米到 20 m~30 m 不等。在湘桂一带, 偶尔也可见人为出露的石林(照片 4)。石牙性质与石林相似, 但规模较小。青藏高原、云贵高原以及湘桂等地红色风化壳底界面上都可见到(照片 5~7)。表面光滑, 呈小型锥丘状, 高度从几十厘米到数米, 石芽间的灰岩面亦较光滑。

收稿日期: 1999—10—24; 改回日期: 2000—01—10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)、中科院青藏高原研究项目(KZ951—A1—204; KZ95T—06)。

作者简介: 李德文(1969—), 男(汉族), 贵州省遵义县人, 北京大学城市与环境学系博士研究生, 主要从事地貌与第四纪研究, E-mail: lidewen@263.net.

在青藏高原上还可见到一些灰岩残柱及残丘,它们主要是寒冻风化形成的地貌形态。前者为孤立突起的灰岩石柱,表面粗糙不平,顶部尖锐。土下作用特征较少。高度变化较大,低的仅数米,高的可达 30 m 以上。后者形态与灰岩残柱相似,只是根部的宽度和长度大于高度,呈锥状。它们可能是在高原隆升后的寒冷气候下改造旧有岩溶形态而成(或新生成)的冰缘岩柱,与保存原始土下溶蚀特征的覆盖型岩溶不同。此外,在灰岩表面还有一些小型的突起和平行溶沟,它们大多是全新世以来雨雪溶蚀的产物,这些不是本文主要讨论的对象。

1.2 覆盖型岩溶表面的特殊形态

在构成覆盖型岩溶的岩体上,常常可以见到一些相对封闭的负地貌形态,如安多北山、滇中石林风景区及黔中红枫湖风景区等。在桂林附近砖厂开挖出的基岩露头上可以见到一些小型的洞穴。根据形态特征的不同,可分以下几个类型:1. 土下溶蚀窗(穿洞),见于安多北山、乃古石林等地。延伸方向不定,长度很少超过 10 m,两端贯通(照片 8),规模小者形态一般较大者圆润光滑。有时壁上有再结晶方解石;2. 土下溶蚀洞,区内常见。规模比溶蚀窗小,见于安多北山、滇中、黔中等地。洞口高度不超过 3 m,向内逐渐变小。延伸较短、较直。在黔中、桂林等地人工开挖出来的岩面上还可以见到充土的小型洞穴;3. 溶蚀龛,见于安多北山、云南石林(照片 2)等地。为灰岩陡壁根部的反倾岩面,横向延伸较短。部分壁龛较深,向洞穴类过渡;4. 溶蚀刻槽(solution notch),见于青藏高原、滇中等地。与溶蚀龛类似,但横向延伸较远。一般位于石林或岩墙的下部岩土界线或地面以上一定高度,呈环绕基部状,在同一地段内可以对比。

2 覆盖型岩溶与红色风化壳的区域特征

青藏高原东部地区覆盖型岩溶再裸露后大都受到后期剥蚀改造,原土下岩溶形态部分被寒冻剥蚀形态所代替。岩墙、石林等主要分布在山顶平坦夷平面的外侧斜坡上部(照片 1)。与主夷平面大致处于同一高度或稍低。红色风化壳仅见于局部凹处或风化裂隙中。在安多北山(5 125 m),残留的红色风化壳厚度> 70 cm,自上而下可分为:1. 根系层,厚约 8 cm;2. 红色土壤,含砾石,厚 12 cm;3. 黄色砂层,含草根、钙斑,厚 22 cm;4. 红色砂质粘土,残留有方解石晶屑,厚 5 cm;5. 黄色粗粉砂层,厚 20 cm;6. 以下为红色粘土层,含石块,石块直径多在 3 cm~5 cm,大者在 10 cm 以上。

在青藏高原东南缘的中甸地区,碳酸盐岩纯度较低,覆盖型岩溶低矮,局部有薄层红土,地表大多覆盖有岩石碎屑。丽江以西大安一带的红土原面上可见斗淋等岩溶负地形。在中甸盆地西北益仁冈山口中甸—德钦公路旁有一人工采土断面(海拔 3 550 m),植被为灌丛和草本植物。剖面特征如下:表层黑色—深灰色表土,厚约 30 cm,有植物根系穿插;二层棕红色粘土,厚 1.5 m,与表层界限明显;三层深灰色石灰岩,与二层界限清晰而不规则,基岩表面的溶蚀形态形似太湖石,高约 0.5 m,红土常以带状贯入。

云贵高原覆盖型岩溶保存较好,部分因风化壳剥离而出露地表,形成石林。滇中地区位于珠江、长江和红河等大河的分水岭地带或河源区。覆盖型岩溶分布广泛。石林风景区(照片 2)即位于高原面上一宽浅的负地形内。在南昆线石林站附近有一覆盖型岩溶剖面,地表为起伏和缓的伐林荒山,海拔约 1 900 m。剖面特征描述如下:1. 表土层,厚约 20 cm,含腐殖质和未分解的植物根系;2. 红色粘土层,在灰岩裂缝中厚度可达 6 m~7 m,与上覆层界限明显;3. 灰色石灰岩,与上覆土层界线清晰,各种土下溶蚀形态与红土在剖面上相互嵌入,起伏达 1 m~2 m。

黔中贵阳、安顺一带是长江、珠江两大水系的分水岭,红色风化壳局部连续。覆盖型岩溶形态常见出露(照片 3,4),在岩性、地貌等条件有利时形成石林(照片 3)。气下作用特征不如滇中一带发育。如镇宁县丁旗镇附近所见石林,位于河源区的宽浅谷地内,高者达十余米。贵阳附近的天河潭与周围的山顶在同一高度(1 250 m)上,在起伏的基岩夷平面上形成一些平缓的沟槽。在天河潭公路、铁路立交位置附近,有一沿裂隙发育的风化壳剖面,其特征如下:1. 褐色表土层,厚约 20 cm,有植物根系穿插;2. 红色粘土层,厚度约 8 m;3. 灰色石灰岩,覆盖型岩溶以沿节理发育的沟槽为主。

湘桂地区覆盖型岩溶大多深埋于开阔平坦的岩溶平原之下,在岩溶平原上分布着许多塔状峰林。从人工断面上或采土坑内可以见到具土下溶蚀特征的覆盖型岩溶,如桂林奇峰镇附近因采土而出露的

覆盖型岩溶呈柱状(照片 5), 高度> 2 m。在道县至宁远公路中段有一采土剖面, 特征如下: 1. 黑褐色表土层, 厚约 10 cm; 2 红色粘土层, 厚度一般 2 m~4 m, 在灰岩裂隙中厚度超过 5 m, 3. 灰白色石灰岩, 呈石牙、石林产出, 与上层红土间界线不规则。

研究区红色风化壳剖面大都具有相似的粒度组成(表 1)。阳离子交换量大致相同。而从风化壳出露的位置、产状、厚度、横向连续性等特征来看, 它们在空间上具有广泛的一致性。各剖面粘粒含量都很高, 在剖面中下部尤其明显, 在中甸等地达 90 % 以上(远高于一般的红色石灰土), 存在明显的粘化作用, 与红色石灰土的剖面构型一致。pH 值大多偏高, 尤其是底部大多接近 8 反映研究区目前的气候条件已经不利于岩溶作用的进行。尤其是安多北山, 风化壳底部 pH 达 9.07, CaCO₃ 含量达 23.69%, 显示土下岩溶作用已经停滞。

表 1 研究区红色风化壳性质特征
Table 1 Main character of red weathering crust on study region

地 区	深度 (m)	pH	有机质 (%)	交换量 (cmol/ kg)	< 0. 001mm (%)	0. 01mm (%)
安多北山 (512.5m)	0~8	8.56	/ ¹⁾	48.90	16.2	28.3
	8~20	8.57	/	52.89	19.5	25.0
	20~42	8.94	/	36.93	19.6	29.5
	42~47	8.81	/	28.69	24.4	52.9
	47~67	8.84	/	36.80	17.8	33.7
	> 67 ²⁾	8.83	/	30.50	47.7	65.9
		8.71	/	31.49	58.6	76.9
		9.07	/	12.97	50.0	90.2
	7.91	1.319	23.58	17.6	62.0	
中甸 (3550m)	1.0	6.91	0.771	24.88	92.5	99.5
	1.5	7.21	0.565	25.94	89.2	98.5
	0.5	6.21	0.579	39.43	53.8	71.5
滇中石林 (1900m)	1.3	6.82	0.712	41.76	71.8	85.4
	2.1	6.83	0.971	52.06	70.0	83.0
	2.9	7.06	0.419	39.29	83.0	91.8
	3.7	7.86	0.484	44.69	73.8	87.0
	4.5	8.15	0.463	48.85	81.2	90.4
	5.3	8.12	0.465	56.68	84.5	92.2
	6.1	8.01	0.325	54.70	78.5	88.4
	0.5	7.72	4.088	47.20	37.6	89.5
	1.5	7.55	1.186	49.29	63.0	94.2
贵阳湖潮 (天河潭) (1250)	2.5	7.59	0.897	41.73	60.6	91.7
	3.5	7.77	2.030	48.73	57.8	90.5
	4.5	7.69	1.914	55.24	58.4	92.8
	5.5	7.72	0.497	42.89	54.6	90.0
	6.5	7.59	0.742	44.10	55.2	90.2
	7.5	7.87	1.581	40.69	37.7	89.6
	3.0	8.06	/	39.78	42.5	88.0
	宁远(250m)	7.62	/	22.69	92.0	100.0

1)无数据; 2)以下三个样品自 67cm 深度以下顺序采取。

3 覆盖型岩溶的演化与岩溶(双层)夷平面

3.1 岩溶区风化壳形成条件与岩溶双层夷平面

岩溶地貌既是气候地貌类型, 又是一种特殊的岩石地貌类型, 其以化学溶蚀为主的形成机理决定了它与常态地貌的差异。在风化壳的发育过程中, 岩溶地貌与常态地貌的差别主要有两点显著的不同。

1. 岩溶区的风化以溶蚀作用为主, 因此碳酸盐岩的风化过程同时包含了剥蚀和搬运过程, 残留下来的物质相对于原岩来说数量大为减少, 因此风化壳的形成需要溶蚀数十倍^[3]或数百倍^[4]厚的岩层, 这必然以大幅度的地貌夷平和降低为前提; 2. 在地貌起伏较大、岩溶作用以垂向发育为主的地区, 地表存在严重的失土(soil loss)现象^[3]。酸性土壤下的灰岩溶蚀使节理进一步开放, 引起土层降低和裂隙扩展, 使土进入近地洞穴系统。因此在岩溶山区只能见到局部保存的黑色石灰土, 即使在植被茂密的原始森林中也不可能发育厚层连续的风化壳。这一点也可从野外观测得到证实。例如在黔南荔波茂兰喀斯特森林自然保护区内, 地表主要由裸岩构成, 根本不可能形成横向连续的风化壳, 更不用说厚层红色风化壳。由此可见, 岩溶区厚层风化壳只能形成于地貌起伏小、垂向岩溶作用不活跃的条件之下。从地理循环的角度来看, 这样的景观就是地貌发育的终结阶段——准平原。因此岩溶区的厚层风化壳不仅包含了大

量的环境信息,而且直接指示地貌发育阶段接近晚期。当时的地貌面已经接近侵蚀基准以及夷平面的形成。Л.Якуцый^[6]在研究热带岩溶地貌时也曾提到,在地貌发育的晚期,地表始出现连续的松散盖层,但他没有把这与夷平面联系起来。

Budel^[7]曾就热带地貌研究的成果指出,在厚层土壤或其它松散层覆盖的热带地区,风化壳由两个活动的面(双层水平面)组成:一个是位于厚层松散层顶部的暴露于气下的冲刷面(Wash Surface),另一个是埋藏于松散层底部,与未风化基岩接触的埋藏面即风化前锋或基面(Base Weathering Front)。研究区岩溶红色风化壳也由两个面组成,因此“双面”的概念可以应用到岩溶地区。为了反映岩溶地貌与常态地貌在风化壳形成机制上的不同,同时又能利用“双面”理论的某些研究成果,作者把前述岩溶地貌演化终结阶段所形成的、以厚层风化壳为特征的夷平面称为岩溶(双层)夷平面(double leveling surfaces of karst planation)。

3.2 岩溶双层夷平面的地貌学意义及其与“双面”模式差异

岩溶双层夷平面不是双面模式的简单翻版,二者的区别首先表现在形成方式上。非岩溶区地貌过程只在地表或近地表一定深度的范围内进行,风化壳是在地貌向下发育的过程中形成的;岩溶地貌过程则是在侵蚀基准以上的整个岩层内进行的,风化壳的形成不是从上往下,而是从一开始就位于侵蚀基准上,因此,连续厚层风化壳不可能象常态地貌那样发育于起伏较大的地区。

其次,岩溶双层夷平面具有特殊的地貌学意义,指示岩溶区厚层风化壳只能形成于地貌演化晚期。非岩溶风化壳尽管在不同景观条件下有很大差别,但它可以存在于不同的地貌发育阶段;虽然不少人把厚层风化壳作为夷平面存在的依据,但是实际观察结果表明,在远离侵蚀基准的起伏极大的现代高山区也可以形成厚层风化壳。如 Garner^[8]在中美洲 Caracas 附近海拔 3 000 m 以上的山区发现,在现代河流深切而成的 V 型谷地两侧的丛林之下,发育着连续的厚层风化壳,其厚度即使在最陡的坡上也超过 3 m。而在岩溶作用最为活跃的热带亚热带林区,只要地貌有一定起伏,就很难形成连续的土层。例如在新西兰,Trudgill^[5]发现在垂向岩溶作用活跃的原生森林内,岩石表面覆盖着一层薄薄的地衣,土壤主要为酸性的有机土壤,厚度仅 10 cm ~ 20 cm。岩溶双层夷平面从岩溶作用的特点及野外观测资料出发,赋予厚层岩溶风化壳特殊的地貌演化阶段的含义,把厚层风化壳与准平原联系起来,因而具有与普通的风化壳不同的地貌学涵义。

第三,岩溶双层夷平面有助于更深入地理解覆盖型岩溶及其次级形态的成因。岩溶双层夷平面由连续厚层风化壳(冲刷面)及覆盖型岩溶(基面)组成,因此风化壳和覆盖型岩溶同样可以作为岩溶双层夷平面存在的依据,具有与夷平面相同的地貌学意义。而 Budel 的双面模式虽然也被用于解释麓原(pediment)、岛山(inselberg)、突岩(tor)等地貌形态的形成^[9],但是还不能从根本上否定 King^[10]的斜坡后退理论。同样,将刻蚀平原普遍作为夷平面类型之一的观点也受到不同程度的质疑^[11]。

既然覆盖型岩溶和红色风化壳直接指示了岩溶双层夷平面的存在,那么,研究区广泛存在于灰岩上的红色风化壳与覆盖型岩溶,就表明当时的地面已经达到岩溶地貌发育的晚期并接近侵蚀基准。同时,组成红色风化壳的红色石灰土也代表了热带亚热带生物气候环境和排水良好、淋溶较强的地貌水文条件^[12];从不同地区红色风化壳样品的测试结果(表 1)来看,它们又都具有相似的粒度组成和性质。因此,作者认为区内覆盖型岩溶及红色风化壳形成于水分热量都很充足的、地貌起伏和缓的准平原环境,属于一个统一的岩溶双层夷平面。

3.3 刻蚀平原与覆盖型岩溶

根据 Budel 的双面模式,在地貌演化过程中,冲刷面与初生面可不断向下拓展。二者速度在夷平阶段大致相等,也即地表冲刷与风化前锋向下的延伸保持平衡,松散层将维持不变的厚度。当地面抬升较快时,冲刷速率超过风化速率。松散层厚度将不断变小直至初生面上不规则的微地貌形态也从松散层下暴露出来。这就是刻蚀平原(etchplain)的整个形成过程^[13]。刻蚀平原上出露的地貌形态,在非可溶岩(花岗岩、片麻岩等)分布区,被称为岛山或突岩^[9]。在岩溶区,风化壳剥离后出露的覆盖型岩溶主要以石林、石牙或岩墙的形式存在。因此在研究区西部和中部,地表常见的石牙、石林,应是对应于岛山或突岩的一种特殊岩石类型,也是土下作用产物经后期剥蚀而裸露出来的,伴随着风化壳的剥离和壳下岩

溶形态的出现, 便从原始的岩溶双层夷平面变成岩溶刻蚀平原。这一点从其分布的地貌部位也可看出: 它们常常是当地某一级地貌面的组成部分。作为岩溶双层夷平面的组成部分的石林等覆盖型岩溶成了刻蚀平原上的典型地貌形态, 且在出露地表后的相当长时间内仍将保留着土下形成的特征。从岩溶双层夷平面的角度来看待这些特征, 有助于理解覆盖型岩溶的地貌意义及其表面次级形态的形成。

3.4 覆盖型岩溶表面次级形态特征的形成

无论岩墙、石林还是石牙, 都是土下作用的产物, 其规模之所以有如此大的差别, 主要是因为不同地区岩石产状和构造组合方式存在很大差异。产状平缓、节理发育适中的厚层灰岩一般较易形成高大的石林; 岩层陡倾的地区容易形成横向延伸的岩墙。其次, 不同规模覆盖型岩溶在地表的分布还受刻蚀程度的影响。刻蚀较浅的地区以石牙为主, 不易发现岩墙、石林等大型形态。第三, 覆盖型岩溶形态还受出露地表后外力作用强度、类型和时间的影响。由于青藏高原地区覆盖型岩溶剥露最彻底, 出露时间较长, 加之现代寒冻风化强烈, 小的形态难于保存, 因此规模较大的岩墙等形态在高原分布较广。

覆盖型岩溶发育于土下环境, 其上寄生的形态特征是岩石本身的不均匀性以及溶蚀作用在空间分布上的不均匀造成的。前者主要受岩性、构造的控制。构造包括产状、节理、断层等, 主要改善原始岩石的透水能力。岩性包括岩性成分、地层组合、岩石结构、力学性质等, 主要决定或影响岩石的溶蚀能力, 以及覆盖型岩溶出露地表后的稳定性。溶蚀能力在空间分布上的不均匀性则受土壤水分分布、水流速度、水流通道等因素控制。在研究区中西部, 覆盖型岩溶的地表出露形式以石林(stone pinnacles)最具代表性, 它们是某些著名风景区的主体景观, 其土下成因已为诸多学者所认同^[4], 而其毫无例外地分布在小型的局部负地形内, 更是其土下成因的确证。但是覆盖型岩溶一旦出露地表, 必然会遭到气下过程的改造, 原先的土下作用特征则逐渐模糊。气下作用主要有两类。一是岩石出露地表后受到雨水的直接溶蚀, 这种情况见于青藏高原、云贵高原覆盖型岩溶出露的所有地区, 但以降水丰沛的云贵高原最典型。二是高寒地区的寒冻风化和剥蚀, 主要出现在青藏高原地区。因此区分土下溶蚀和气下改造特征是正确识别覆盖型岩溶的关键。溶蚀作用主要受两个子过程控制^[5]。一是水岩界面上的溶解过程, 二是界面上饱和溶液的搬运过程。土下溶蚀与气下溶蚀的本质差别^[5]在于前者受到土壤水的腐蚀浸泡, 作用时间较长, 因此溶蚀作用的强弱取决于土壤水溶液的运移能力(即搬运约束型—transport limited); 后者只受到雨水作用下的短暂溶蚀, 溶蚀强度受制于化学反应的速度(即反应约束型—reaction limited)。另外, 酸性土壤水的溶蚀能力也比雨水强得多。表 2 列出了研究区土下及气下改造的性质和作用特点。

表 2 覆盖型岩溶土下溶蚀与气下改造过程、形态特征比较

Table 2 Contrast of process and morphological character between subsoil erosion and subaerial reworking

地貌要素	土下溶蚀	气下溶蚀	风化剥蚀
地貌过程特点	土壤水分分布及水流通路	雨水和岩面集水的水力性质以及岩石本身性质的均一性	以岩石的机械崩解为主
溶蚀形态特征	形态较为圆润, 近地表部位保存较完整, 方向性不明显	较为粗糙(尤其正地貌), 愈近上部愈明显, 垂向特征明显	不规则裂面, 岩体外部及向阳部位较强, 在窗洞内部等较封闭部位改造较弱
主要控制因素	搬运控制型	反应控制型	气温

寄生在岩墙或石林上的窗洞类地貌形态的成因较为复杂。根据各种相关证据分析, 作者认为其成因主要可分为三种情况。一是在有利的岩性构造等条件配合下, 与覆盖型岩溶同期发育的。由于地下 CO₂ 分压高, pH 值低, 因此地下水只要保持一定的流动性则其溶蚀能力将是很强的。当地下水在透水的裂隙中运动时, 很容易使通道拓展成规模较大的空间。在安多北山、郎木寺等地所见的窗洞, 其形态蜿蜒曲折, 延伸方向不定, 推测可能形成于地下水水平活动带(潜水位)以下。在溶蚀过程中, 细粒物质随水沿裂隙贯入, 同时洞道不长(很少超过 10 m), 松散的土层也可以从两端填充, 因此洞道拓展和土层填充基本上是同步进行的。在贵州红枫湖风景区及桂林附近人工剥露的石林上仍可见到被土充填的小型洞穴。细粒物质的填充是洞穴得以长期保存的关键。当外部条件发生变化(如气候变化、地壳抬升等), 地下水位下降和风化壳层的淋溶条件改变, 地表水通过土层渗入洞道后 CaCO₃ 呈过饱和状态, 就会

在空隙内沉积再结晶方解石。根据再结晶方解石裂变径迹测年结果^[3],这一事件发生的时间是在中新世。这也应该是高原夷平面完成后环境发生突变的大致时间。随着刻蚀作用的进一步发展,土层逐渐剥离,在青藏高原地区,目前所见的窗洞类景观(照片6)已经在很大程度上被后期寒冻风化剥蚀作用所改造,但其主体形态的形成当是地下成因。

其次,部分窗洞可能形成于剥露过程中刻蚀作用相对滞缓的时期。在基岩露头脚部这个大气、土壤和基岩三者共存的特殊环境,如果冲刷面在基岩露头的某一高度停留的时间较长,土下与气下溶蚀能力的差别导致的差异风化就有可能形成特征的溶蚀刻槽(solution notch)。不过这一过程要求土壤有较强的溶蚀能力,因此只能发生在水热条件较好的环境。在青藏高原,红色风化壳中已有 CaCO_3 的淀积(如安多北山),pH值达8.5以上,这样的土层只能对基岩起保护作用^[3],因此目前已经不具备形成溶蚀刻槽等形态的条件。这些溶蚀形态沿岩土界线向基岩内凹进,在安多北山、大石林、小石林等地都可见到。如果地面保持较长时间的稳定,单薄岩墙两侧的溶蚀刻槽蚀穿成一体应该不成问题。Bloom^[11]认为岩溶平原上酸性沼泽水在灰岩陡崖的基部可以形成深度超过1m的窄缝或洞穴,特别是当水位达到地面和渗透缓慢时,留下的残积层和碎屑可以防止向下的溶蚀,形成特征的沼泽刻槽(swamp slot)、角洞(foot cave)等。研究区部分窗洞类景观很可能就是剥蚀抬升过程中经由上述方式在覆盖型岩溶岩体上形成的,只不过由于土层的进一步剥蚀而目前已经到了地面以上一定高度。

此外,单纯的物理风化作用也可以形成部分小型窗洞,这种情况见于青藏高原。其特征与溶蚀成因的洞穴相去甚远,在此不再详述。

4 几点认识

由于覆盖型岩溶及红色风化壳长期处于地表或近地表条件下,侵蚀基准或外力条件的变化使研究区覆盖型岩溶受到不同程度刻蚀作用和其它过程的影响。就研究区整体而言,以机械作用方式为主的地貌过程强度和程度从东向西递增,而以化学作用方式为主的地貌过程强度和程度从东向西递减。前者是与抬升引起的地势本身的高低有关,后者与抬升引起的水热条件的变化有关。岩溶双层夷平面随着高度变化而表现不同的特征,青藏高原岩溶作用停滞,寒冻风化和剥蚀作用逐渐居于主导地位,覆盖型岩溶剥露地表,形成刻蚀平原,云贵高原局部存在不同程度的剥蚀,岩溶双层夷平面在向刻蚀平原转化,继承性岩溶作用可能微弱存在^[15,16]。而湘桂地区覆盖型岩溶可能受到新的岩溶地貌旋回的叠加,表现出明显的继承性。在相当程度上已经改造了过去的岩溶双层夷平面,但覆盖型岩溶的性质是一样的。

通过上述讨论主要获得以下认识:

1. 野外观测资料表明,区内覆盖型岩溶不同程度地保留着土下作用的特点,而伴生的红色风化壳也具有某些相似的性质特点,作者认为它们源于一个统一的岩溶夷平面。根据岩溶作用的特殊性,作者提出岩溶双层夷平面的概念,把覆盖型岩溶(及红色风化壳)与夷平面联系起来,避免了单纯运用“双面”模式所引起的歧义。

2. 覆盖型岩溶及红色风化壳的形成对应于岩溶地貌发育的晚期,而其形成的原始位置接近侵蚀基准。因此,覆盖型岩溶及红色风化壳可以指示夷平面的存在、性质和分布。

3. 区内广泛分布的石林、石牙等地貌形态是覆盖型岩溶经刻蚀作用剥露而成的,是刻蚀平原的组成部分,其剥露的程度以及剥露后改造的性质和程度,主要受制于夷平面抬升过程中所经历的外力作用强度、类型等。

4. 研究区覆盖型岩溶现阶段的表现是不同程度剥蚀作用的结果。覆盖型岩溶在青藏高原剥露最彻底,岩石表面(特别是上部)被寒冻剥蚀成斑驳的岩墙、石林;红色风化壳仅存根部。云贵高原局部半裸露,形成高大的石林景观,其上部已经被雨水改造成针状、尖脊状。东部地区如桂北、湘南等地覆盖型岩溶仍被深埋地下,仅在人为剥露的覆盖型岩溶上见溶蚀痕迹。

参考文献:

[1] 崔之久,高全洲,刘耕年,等.古岩溶、夷平面与高原隆升[J].中国科学(D辑),1996,26(4):378~385.

- [2] 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 青藏高原夷平面与岩溶年代及其初始高度[J]. 科学通报, 1996, 41(15): 1402~1406.
- [3] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [4] 韦启蹯. 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.
- [5] Trudgill S.. *Limestone geomorphology*[M], New York: Longman Inc., 1985.
- [6] Л. ЯКУЧУ. Морфогенез карстовых областей: Варианты эволюции карста[M], Москва: Изд-во, 1979. 388.
- [7] Budel. Die Doppelten Einebnungsflächen in Den Feuchten Tropen[J]. Z. Geomorph., 1957, 1(2): 223~225.
- [8] Garner H. F.. Stratigraphic sedimentary significance of contemporary climate and relief in four regions of the Andes mountains[J]. Geological Society of America Bulletin., 1959, 70(10): 1327~1368.
- [9] Twidale C. R.. Granitic Inselberg[A]. In: *Perspectives in Geomorphology*[C], 1982(Vol. 1). 127~67.
- [10] King L. C., Canons of landscape evolution[J]. Geol. Soc. America Bull., 1953, 64, 721~752.
- [11] Bloom A. L., Geomorphology: A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landform[M], Printice-Hall, Inc. 1998.
- [12] 郭景唐, 欧阳菁. 中国土壤剖面图谱[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 52.
- [13] 崔之久, 李德文, 伍永秋, 等. 关于夷平面[J]. 科学通报, 1998, 43(17): 1794~1804.
- [14] 林钧枢. 路南石林形成过程与环境变化[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 346~350.
- [15] He Caihua, The Characteristics of Karst Geomorphology in Guizhou[A], In: Garrdiner(Editor). International Geomorphology 1986, (part 2)[C], 1987.
- [16] Xiong Kangning. Morphometry and Evolution of Fengling Karst in the Shuicheng Area, Western Guizhou, China[J]. Z. Geomorph. N. F., 1992, 36(2): 227~248.

FEATURE AND ORIGIN OF COVERED KARST ON HUNAN, GUANGXI, GUIZHOU, YUNNAN AND TIBET

LI De-wen, CUI Zhi-jü, LIU Geng-nian

(Department of Geography, Peking University, Beijing 100871 PRC)

Abstract: In light of the formation conditions of karst weathering crust and the characters of the red weathering crust and the covered karst on research district, this paper suggests a new concept of weathering crust and geomorphologic evolution stage. Since the thick and continuous weathering crust is only formed on base level of erosion, it indicates existence of the planation surface mentioned above. The double leveling surfaces of karst planation is made up of thick weathering crust and covered karst. Thereby the covered karst also indicates the existence of the monitioned surfaces of karst planation just like the weathering crust. Authors believe that the double leveling surfaces of karst planation exists at overall study region, and the covered karst is its own base weathering front according to characters of the covered karst and the weathering crust of this district. Present forms of covered karst on research area, such as stone pinnacles and rock wall, are just the result of etching to various degrees. These type of covered karst have the same subsoil features and also have the reworked subaerial characters that varies from west to east alone with the etching degree, surface exposure time and environment.

Key words: covered karst; red weathering crust; double leveling surfaces of karst planation; etchplain



照片1 西藏安多北山的剥蚀残留式石墙和石林(覆盖型岩溶)已经完全裸露, 石林的脚部可见溶蚀窝。(崔之久 摄)



照片2 滇中高原的半裸露石林(海拔1900m)。地表为红色风化壳, 石林顶端被改造为针状, 土下溶蚀作用特征愈往下愈明显。(崔之久 摄)



照片3 黔中高原的半裸露石林(海拔1500m), 气下改造特征不明显。(李德文 摄)



照片4 湘桂一带的覆盖型岩溶(海拔150m), 因人工聚土而出露地表。(李德文 摄)



照片5 黔中一带的半裸露石牙(海拔1200m)。(崔之久 摄)



照片6 红枫湖风景区的覆盖型岩溶, 部分为人工剥露。(崔之久 摄)



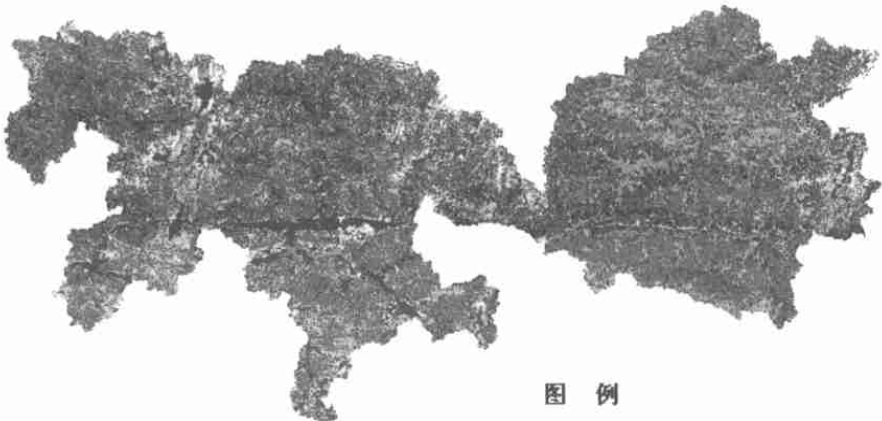
照片7 贵州平坝附近，砖厂开挖出来的覆盖型岩溶剖面(海拔1400m)。
(崔之久 摄)



照片8 青藏高原的大型穿洞，洞壁有再结晶方解石
(F.T. 年龄为中新世)。(崔之久 摄)

黄裕婕，等：西藏中部的生态环境综合评价

HUANG Yu-jie *et al.* Eco-environment Synthetic Evaluation in Mid-Tibet



- | | |
|--------|--------|
| 环境评价一级 | 环境评价五级 |
| 环境评价二级 | 环境评价六级 |
| 环境评价三级 | 环境评价七级 |
| 环境评价四级 | 环境评价八级 |

图1 西藏中部生态环境综合评价分配图
Fig.1 Classification Mid-Tibet eco-environmental synthesis evaluation