

锥峰和塔峰溶丘地貌的表层喀斯特 带径流溶蚀形成机制

张信宝^{1,2}, 刘再华², 王世杰², 陈喜³

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地环境演变与调控重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘 要: 塔峰、锥峰和常态山是西南喀斯特地区的三种主要丘陵形态。表层喀斯特带径流溶蚀动力学机制可以较好的解释喀斯特坡地发育。表层喀斯特带的顺坡径流量大的喀斯特地区, 坡地溶蚀速率高, 易于塔峰和锥峰地貌的形成, 反之, 易于常态山地貌的形成。降水、岩层结构等环境要素控制了表层喀斯特带的顺坡径流量。西南喀斯特地区的这三种溶丘的空间分布和这些环境要素的区域差异有关。

滇东高原、贵州高原和广西丘陵平原的岩性和大地构造条件差异不大, 气候是这三地溶丘地貌形态差异的主要原因。滇东高原为西南季风气候区, 降水量较低, 表层喀斯特带顺坡径流量小, 溶丘地貌以常态山为主; 其余两地为东亚季风气候区, 降水量较高, 表层喀斯特带顺坡径流量大, 溶丘地貌以锥峰和塔峰为主, 其中, 广西丘陵平原的降水量大于贵州高原, 前者溶丘地貌以塔峰为主, 后者以锥峰为主。

关键词: 喀斯特; 表层喀斯特带; 径流; 塔峰; 锥峰

中图分类号: P931.5

文献标识码: A

我国西南喀斯特地区, 热带喀斯特峰林和峰丛地貌分布广泛, 景观千姿百态。峰丛和峰林喀斯特的溶丘形态分别主要为锥峰和塔峰。贵州高原面上多以锥峰为主的峰丛洼地; 广西盆地多以塔峰为主的峰林平原。世界其他热带和亚热带地区也有少量峰林和峰丛地貌分布, 如越南, 马来西亚, 印度尼西亚, 缅甸, 老挝, 菲律宾, 巴布亚新几内亚, 泰国, 柬埔寨, 墨西哥, 伯利兹, 危地马拉, 古巴, 波多黎各, 牙买加和伊斯帕尼奥拉等国家或地区^[1-2]。而包括我国北方在内的世界非热带、亚热带湿润气候的喀斯特地区, 无峰林和峰丛地貌发育, 溶丘形态为常态山^[2-4]。显然, 降水诱导的碳酸盐岩石的高化学溶蚀速率, 是热带、亚热带地区喀斯特地区峰林和峰丛地貌发育的基本原因。加拿大等个别寒冷地区报道的所谓“塔状喀斯特”, 塔丘地貌不典型, 不是碳酸

盐岩溶蚀的结果^[4]。除气候条件外, 峰丛和峰林地貌的形成还需要适宜的岩性、岩层产状和地形条件, 如, 厚度较大的碳酸盐岩层, 产状水平的岩层, 长期稳定的较平坦地形等^[5]。

20 世纪 50 年代以来, 源于 Davis 地貌演化论的“峰丛(青年期)→峰林(壮年期)→孤峰(老年期)”的喀斯特地貌演化理论^[5-6], 受到了挑战。袁道先, 朱学稳和 Williams 等, 主要通过中国桂林一带的峰林和峰丛地貌的研究认为, 多数情况下, 峰林并不是从峰丛演化而来, 两者是同一时期(或相近的年代), 不同水文地质环境条件下形成的喀斯特地貌^[1,7-9]。袁道先认为, 关键是有无外源水作用, 峰林主要是外源水作用的产物, 而峰丛则是以内源水作用为主^[7]。熊康宁认为, 潜流基面浅埋和强大的地表水流相结合是锥状喀斯特向塔状喀斯特转化的

收稿日期(Received date): 2011-03-31; 改回日期(Accepted): 2011-08-10.

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项重大课题(XDA05070400), 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室资助项目(SKLECG9008)。[Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDA05070400, Foundation Project of State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences(SKLECG9008)).]

作者简介(Biography): 张信宝(1946-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。[Zhang Xinbao (1946-), Male, Professor, Doctoral supervisor, Research filed: soil erosion and conservation.] E-mail: zxbao@imde.ac.cn

基本条件,二者缺一不可,而外源水的存在与否并不重要^[10]。

20世纪80年代以来,表层喀斯特带在喀斯特坡地水循环中的重要性逐渐为人们所认识^[7,11]。本文试图从表层喀斯特带径流溶蚀控制喀斯特坡地发育的角度,探讨锥峰和塔峰地貌的形成机制,以期阐明西南喀斯特地区峰丛和峰林地貌的区域分布规律。

1 溶丘的形态及岩土组构

塔峰、锥峰和常态山等三种溶丘的典型形态和

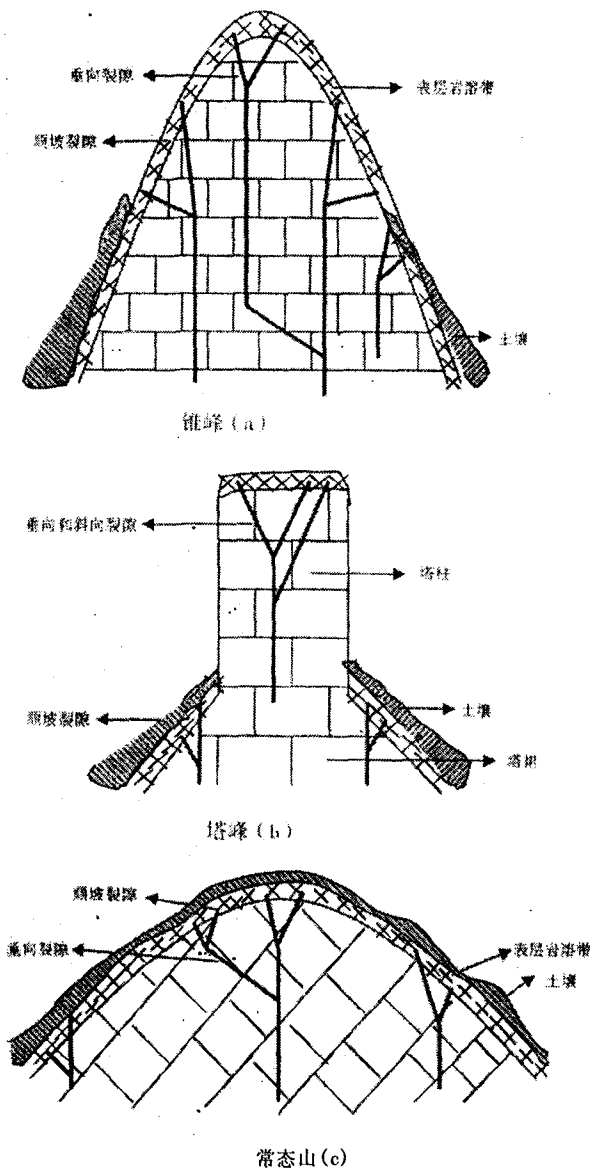


图1 锥峰(a),塔峰(b),常态山(c)三种溶丘的典型形态和岩土组构示意图

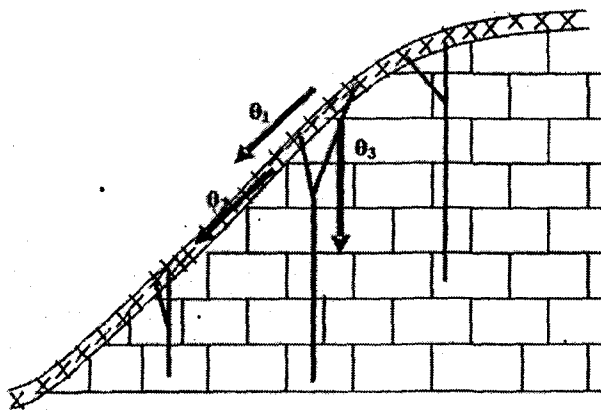
Fig.1 A sketch of typical shapes and rock-earth composition and texture for three types of karst hills: cone (a), tower (b) and normal (c).

岩土组构见图1。典型的锥峰形似金字塔,坡地平均坡度30°左右,坡上较陡,坡麓较缓。组成锥峰溶丘的厚层碳酸盐岩产状基本水平,表层喀斯特带内的顺坡裂隙非常发育,下伏的完整岩层也发育有垂向、水平方向和斜向的裂隙,但裂隙发育程度远低于表层喀斯特带。典型的锥峰溶丘坡地,上部为溶沟、溶槽和溶穴发育的石质坡地,中部为不连续分布土壤覆盖的土石质坡地,下部为土壤连续分布的土质坡地。坡地土壤多为石灰土,顺坡向下常渐变为坡麓的黄土,坡地上部土壤多含角砾,顺坡向下角砾含量逐渐减少,坡麓土壤多不含角砾。坡地总体平顺,溶沟、溶槽发育,地面冲沟不发育。和石灰岩锥峰相比,白云岩锥峰顶部浑圆。典型的塔峰溶丘上部为塔柱,下部为塔裙。同锥峰溶丘,典型塔峰溶丘岩层的产状也基本水平。塔柱顶部浑圆或为平顶,塔柱陡立,坡度多>60°,岩层直接出露。柱体岩层发育有垂向、水平方向和斜向的裂隙。塔裙坡地的形态、岩土组构,表层喀斯特带、岩层裂隙和土壤发育情况同锥峰溶丘坡地。塔裙表面常分布有塔柱崩塌形成的薄层散落角砾堆积。部分塔峰溶丘,只有塔柱,塔裙不发育。石灰岩锥峰和塔裙坡地的岩土组构和白云岩有明显差异:石灰岩坡地的地表土壤和下伏基岩直接接触,土下岩层垂直和层状裂缝和裂隙发育,土体充填垂直裂缝成为土楔,部分土楔宽数十厘米,深数米,土石质坡地的地表土壤常呈鸡窝状分布;白云岩坡地的地表土壤和下伏基岩之间常存在厚度数厘米至10 cm多的“糖砂层”。土下岩层弥漫状的裂隙发育,极少土状物质充填,土体充填的垂直裂缝不发育。常态山溶丘的形态和非碳酸盐岩山丘往往难以区分,但仔细观测,仍可发现山形较为浑圆,丘坡的地形纵剖面多呈上凸形,丘坡坡地坡度较缓,平均坡度多小于20°,一些低缓的溶丘呈丘岗状。高原面上典型溶丘坡地的土壤为黄壤或石灰土,坡地土层发育保存远较锥丘为好,表层土壤和下伏基岩也呈直接接触。坡顶和上部坡地或有基岩出露,以下的大部坡地为土质坡地,鲜见岩石露头,土层顺坡向下逐渐增厚。溶丘坡地地下风化壳岩层的缝、隙、孔、洞往往也很发育。

2 溶丘坡地的形成机理

坡地地貌演化是流水侵蚀、重力侵蚀和化学侵蚀综合作用的结果。许多学者正确的指出,化学溶

蚀是喀斯特坡地地貌演化的基本营力^[2,5,7,9],化学溶蚀的介质是水,在相同的环境条件下,化学溶蚀量和径流量成正相关。喀斯特坡地的径流流向见图2。



θ₁ 地表径流, θ₂ 表层喀斯特带顺坡径流, θ₃ 表层喀斯特带垂向入渗径流

图2 喀斯特坡地径流示意图
Fig.2 A sketch of runoffs on karst slopes

降水产生的地表径流部分渗入表层喀斯特带。据中科院地化所普定喀斯特生态站大型全坡径流试验场2007—2011年的资料,径流系数均低于0.05(表1),长沙亚热带农业生态所广西环江喀斯特生态站径流试验场的径流系数相近。这表明降水径流几乎全部渗入表层喀斯特带,坡地地表径流很少^[13-14]。显然,地表流水侵蚀不是溶丘坡地演化的主要营力。这和溶丘坡地较为平顺,溶沟、溶槽和溶坑发育,冲沟不发育的实际相符。渗入表层喀斯特带的径流,一部分沿表层喀斯特带顺坡裂隙流动,一部分沿垂向裂隙向下入渗,部分垂向入渗的径流有

可能又沿水平或斜向裂隙返流到表层喀斯特带。沿垂向裂隙向下入渗的径流溶蚀山体内部岩石,不影响坡地边坡的发育。沿表层喀斯特带顺坡裂隙流动的径流(下称表层喀斯特带顺坡径流),溶蚀坡地表层喀斯特带的岩石,对喀斯特坡地的演化具有举足轻重的影响。表层喀斯特带顺坡径流源于降水,喀斯特坡地的降水分配可表述为

$$W = W_1 + W_2$$

$$W_2 = WQ_1 + WQ_2 + WQ_3$$

式中 W :降水量(mm); W_1 :蒸散发耗水(mm); W_2 :径流深(mm); WQ_1 :地表径流深(mm); WQ_2 :表层喀斯特带顺坡径流深(mm); WQ_3 :净垂向入渗径流深(mm)。

表层喀斯特带顺坡径流的流量随着坡长的增加而增大,溶蚀速率也随着坡长的增加土壤水的溶蚀力增加而升高。随着时间的推移,坡地下部溶蚀的岩层厚度越来越大于坡地上部,坡地因此变得越来越陡,锥峰和塔峰溶丘逐渐形成。坡度大于休止角37°的坡地稳定性差,因此峰丛和峰林地貌中坡度30°左右的溶丘最为普遍。和完整的岩层相比,松散堆积物更易于遭受溶蚀,因此溶丘坡地松散角砾堆积物一般不发育。

高溶蚀速率和高强度岩层有利于塔峰溶丘的形成。高溶蚀速率利于塔柱陡坡的形成,高强度岩层又利于维持高陡塔柱边坡的稳定。长期的地质时期中,塔柱边坡不可避免要发生大大小小的崩塌,崩塌角砾撒落于塔裙表面,成为表层喀斯特带的一部分,松散的散落角砾最易于表层喀斯特带顺坡径流的溶蚀,起到了减轻下伏基岩溶蚀的作用。塔裙不发育的塔柱,可能是地表河流侧蚀的结果。

表1 贵州普定陈旗小流域径流场2007—2011年的径流系数

Table 1 Runoff indexes of the runoff plots in the Chengqi Gully Watershed Puding County, Guizhou

土地利用	草灌植被已恢复 的火烧迹地	草灌植被未恢复 的火烧迹地	次生林	坡耕地	放牧 灌草地	乔灌混交林 +草地	
小区面积/m ²	684.3	1 255.1	1 146.4	2 440.4	2 890.0	2 439.6	
坡度/°	32	37	35	30	31	36	
裸岩率/%	37	35	30	30	50	35	
年份	降雨量/mm	径流系数/%	径流系数/%	径流系数/%	径流系数/%	径流系数/%	
2007	553*	0.19	0.42	0.17	0.85	1.25	2.16
2008	1401	0.27	0.58	0.20	0.68	4.53	3.08
2009	861	0.23	0.60	0.21	0.13	2.81	1.92
2010	702	0.15	0.34	0.16	0.10	0.11	0.11

* 2007年7-12月

3 溶丘地貌形成条件和区域分布特点的 解释

3.1 峰林和峰丛地貌的岩石组构条件

产状水平的厚层碳酸盐岩层,不利于垂向裂隙的发育,垂向入渗径流深(WQ_3)比例小,表层喀斯特带顺坡径流深(WQ_2)比例大,有利于表层喀斯特带的化学溶蚀,利于锥状和塔状峰林和峰丛地貌的形成。此类岩层强度高,在高溶蚀速率的地区,特别易于形成塔峰溶丘。产状垂直的碳酸盐岩层,有利于垂向裂隙的发育,和水平产状岩层相比,垂向入渗径流深(WQ_3)比例相对较大,表层喀斯特带顺坡径流深(WQ_2)比例相对较小,不利于表层喀斯特带的化学溶蚀,不利于峰林和峰丛地貌的形成。

时代较新的碳酸盐岩,没有经过长期的压实,孔隙度高,易于含蓄水分和水分向下垂直入渗,表层喀斯特带顺坡径流量小,加之岩石强度低不能维持高陡的边坡,不利于峰丛和峰林地貌的形成。世界上的热带和亚热带碳酸盐岩区,多侏罗纪以来的时代较新的碳酸盐岩,老碳酸盐岩分布较少;我国西南地区大地构造属上扬子地台,碳酸盐岩多质纯层厚,时代均老于侏罗纪,因此峰丛和峰林地貌分布非常广泛。

3.2 西南喀斯特地区溶丘地貌的区域分布规律

贵州高原面,以锥峰溶丘为主;广西丘陵平原以塔峰溶丘为主;除临近贵州、广西的罗平等地外,滇东高原以常态山溶丘为主。这三地的年降水量大致分别为1 200~1 400 mm、1 600~1 800 mm和900~1 000 mm。降水量越大,地下径流量越大,溶蚀速率越高。据宋林华研究,红水河流域喀斯特地区的平均溶蚀速率,上游地区(云南部分)20~50 mm/ka;中游地区(贵州部分)40~60 mm/ka;下游地区(广西部分),50~80 mm/ka^[6]。一般而言,地下径流量越大,表层喀斯特带顺坡径流量也越大。我们认为,这三地的岩性和大地构造条件差异不大,气候是溶丘形态的区域差异的主要原因:滇东高原为西南季风气候区,降水量较低,表层喀斯特带顺坡径流量小,溶丘地貌以常态山为主;其余两地为东亚季风气候区,降水量较高,表层喀斯特带顺坡径流量大。溶丘地貌以锥峰和塔峰为主,其中,广西丘陵平原的降水量大于贵州高原,前者溶丘地貌以塔峰为主,后者以锥峰为主。

3.3 塔峰、锥峰和常态山溶丘并存的现象

无论是广西峰林平原区,还是贵州高原峰丛注

地区,都不是清一色的塔峰或锥峰顺坡径流,而是以塔峰或锥峰溶丘为主,也存在其他类型的溶丘地貌。岩性、产状等岩层组构条件也对表层喀斯特带的顺坡径流量有重要的影响,因此不同形态的溶丘并存于同一地区是正常现象。外源水的加入,提高了喀斯特地区的潜水位,表层喀斯特带径流的垂直入渗比例因此而有所减少,顺坡径流比例有所增加,可能对促进塔峰溶丘的发育起到了一定的作用。

4 结语

表层喀斯特带顺坡径流的化学溶蚀,是西南喀斯特溶丘边坡形成演化的主要营力。表层喀斯特带顺坡径流的流量随着坡长的增加而增加,溶蚀速率随着坡长的增加而升高。随着时间的推移,坡地下部的溶蚀厚度越来越大于坡地上部,坡地变得越来越陡,锥峰和塔峰溶丘逐渐形成。

表层喀斯特带顺坡径流化学溶蚀控制喀斯特坡地发育的动力学机制,可以较好地解释西南喀斯特地区溶丘地貌形成条件和区域分布的一些特点。如产状水平的厚层碳酸盐岩层,不利于垂向裂隙的发育,垂向入渗径流深比例小,表层喀斯特带顺坡径流深比例大,有利于峰林和峰丛地貌的形成。其他类型的碳酸盐岩层,地表径流或垂向入渗径流比例大,表层喀斯特带顺坡径流量小,不利于锥峰和塔峰溶丘地貌的形成。

西南喀斯特地区岩性和构造条件差异不大,气候是溶丘形态区域差异的主要原因:滇东高原为西南季风气候区,降水量较低,表层喀斯特带顺坡径流量小,溶丘地貌以常态山为主;广西丘陵平原和贵州高原为东亚季风气候区,降水量较高,表层喀斯特带顺坡径流量大,溶丘地貌以塔峰和锥峰为主,其中,后者降水量大于前者,后者溶丘地貌以塔峰为主,前者以锥峰为主。

参考文献(References)

- [1] Zhu Xuewen. Discussions on fenglin karst in China [J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28 (2): 155 - 168 [朱学稳. 我国峰林喀斯特的若干问题讨论 [J]. *中国岩溶*, 2009, 28 (2): 155 - 168]
- [2] Sweeting M M. *Karst landforms* [M]. London: Macmillan, 1972
- [3] Yuan Daoxian. Karst in southwest china and its comparison with karst in north China [J]. *Quaternary Sciences*, 1992, 4: 352 - 361 [袁道先. 中国西南部的岩溶及其与华北岩溶的对比 [J]. *第四纪研究*, 1992, 4: 352 - 361]
- [4] Brook G A, Ford D C. Origin of labyrinth and tower karst and cli-

- matic conditions necessary for their development [J]. *Nature*, 1978, 275: 493 - 496
- [5] Ren Meie, Liu Zhenzhong. Introduction to karst [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983 [任美镔, 刘振中. 岩溶学概论 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983]
- [6] Song Linhua. Progress and trend of karst geomorphology study [J]. *Progress in Geography*. 2000, 19 (3): 193 - 202 [宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势 [J]. 地理科学进展, 2000, 19 (3): 193 - 202]
- [7] Yuan Daoxian. Karst in China [M]. Beijing: Geological Press, 1993 [袁道先. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1993]
- [8] Xiong K N. Morphometry and evolution of fenglin karst in the Shuicheng area, western Guizhou, China [J]. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1992, 36: 227 - 248
- [9] Williams P W. Geomorphic inheritance and the development of tower karst [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12: 453 - 465
- [10] Xiong Kangning. Hydrodynamic genetics of cone karst and tower karst with special reference to the middle Guizhou [J]. *Carsologica Sinica*, 1994, 13 (3): 237 - 246 [熊康宁. 关于锥状喀斯特与塔状喀斯特的水动力成因研究——以黔中地区为例 [J]. 中国岩溶, 1994, 13 (3): 237 - 246]
- [11] Liu Zaihua. Karst dynamics theory and its environment [M]. Beijing: Geological Press, 2007: 221 [刘再华. 岩溶作用动力学与环境 [M]. 北京: 地质出版社, 2007: 221]
- [12] Yu Jinbiao, Yang Lizheng, Zhang Haisheng, et al. Typical research on development law of karst [M]. Beijing: Scientific Press, 1990 [俞锦标, 杨立铮, 章海生, 等. 中国喀斯特发育规律典型研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990]
- [13] Peng Tao, Wang Shijie, Zhang Xinbao, et al. Results of preliminary monitoring of surface runoff coefficients for Karst slopes [J]. *Earth and Environment*. 2008, 2: 152 - 157 [彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报 [J]. 地球与环境, 2008, 2: 152 - 157]
- [14] Zhang Xinbao, Wang Shijie, Cao Jianhua, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area [J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29 (3): 57 - 62 [张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题 [J]. 中国岩溶, 2010, 29 (3): 57 - 62]

Dynamic Mechanism of Runoff Corrosion in the Epikarst Zone on the Formation of Cone and Tower Karst Landforms

ZHANG Xinbao^{1,2}, LIU Zaihua², WANG Shijie², CHEN Xi³

(1. Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, & Ministry of Water Conservancy, Chinese Academy of Sciences, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

3. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Tower, cone and normal karst hills are three major types of karst hills in the karst area of Southwest China. A dynamic mechanism of chemical erosion by the runoff in the epikarst zone, proposed in this paper, is able to explain slope evolution of karst hills. In the karst area, where the epikarst zone of a hill has big down slope runoff discharge, chemical erosion rate is high on the hill slope and it is prone to formation of tower and cone karst hills, otherwise prone to formation of normal karst hills. The relevant environmental factors, such as, precipitation and rock texture and structure have great influences on the down slope runoff discharge in the epikarst zone. Spatial distribution of the three types of karst hills are related to the variation of those environment factors in the karst area of Southwest China.

The Eastern Yunnan Plateau, the Guizhou Plateau and the Guangxi Hilly Plain have no significant differences in lithology of carbonate rocks and geotectonics and climate is the principle factor for the difference in karst hill shapes between the three areas. In the Eastern Yunnan Plateau experiencing the Southwest Monsoon climate, the normal hill is the principle karst hill type, because of the relatively low precipitation. In the other two areas, the cone and tower hills are the principle karst hill types because of the high precipitation, in which the tower is the principle shape in the Guangxi Hilly Plain area with the highest precipitation while the cone is the principle type in the Guizhou Plateau with the relatively higher precipitation.

Key words: karst; epikarst zone; runoff; cone karst; tower karst