

文章编号:1001-4810(2000)01-0044-08

峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用^①

杨明德,梁 虹

(贵州师范大学资源与环境科学系,贵阳 550001)

摘 要:对喀斯特的重要地貌景观——峰丛洼地(锥状喀斯特),从水文地貌学观点分析论述了其气候形态学特征、地貌结构、地貌发育演化动力过程以及与内源水作用过程相关的多元水赋存特点及其水资源开发利用形式。

关键词:峰丛洼地;演化;动力过程

中图分类号:P931.5;TV213 **文献标识码:**A

0 引 言

在全球湿热带喀斯特区,发育了三大喀斯特地貌景观类型系列——锥状喀斯特(cone karst)、塔状喀斯特(tower karst)和针状喀斯特(pinnacle karst),而峰丛洼地是锥状喀斯特(cone karst,cockpit)的典型代表,也是湿热带喀斯特区最重要的一种地貌景观类型。峰丛洼地主要分布于世界低纬度湿热带、亚热带气候区,在我国南方尤分布广泛、发育典型。峰丛洼地不仅有正负地形的独特形态结构、水动力过程,而且还有着与湿热气候相关的发育演化过程和动力模式,因此也形成了其特殊的水文结构及水赋存特点。本文就是从水文地貌学观点和分析方法来讨论峰丛洼地结构、强溶蚀动力过程、地貌发育演化动力过程以及水赋存特性及其不同的开发利用形式。

1 峰丛洼地的水文地貌结构

标准的峰丛洼地地貌结构是锥状峰林正地形与似倒锥状(漏斗状)、筒状洼地负地形共同组成的正负地形组合系统,即单个的石峰呈锥状或塔状,单个的洼地呈五边形或六边形,正负地形相互依存、互为补偿,构成相对稳定的平衡态结构。据黔、桂典型峰丛洼地区大量形态测量统计表明:峰洼平均高差一般在140~230m,多边形洼地面积平均多为0.15~0.38km²,但洼底面积平均仅0.038~0.055km²,峰洼(底)面积率平均为[6.5~8.5]:1,且多边形洼地面积及峰洼高差构成的空间规模有随降水量和温度(热量带)的增高而变大的趋势。由于锥峰洼地

^① 贵州省自然科学基金项目(3073号)

第一作者简介:杨明德,男,教授,1933年生,1957年华东师范大学自然地理(地貌)研究生毕业。通信地址:贵州省贵阳市贵州师范大学。

收稿日期:2000-01-02

正负地形的转换交接面是形态结构的水文地貌作用能量界面，一般表现为锥峰洼地间的垭口，多个垭口的联合即构成一个作用性质不同的地貌动力分界面。界面之上的锥峰，是水流作用过程的散流区，以相对均一的蚀低作用为主，在演化过程中能保持形态的动力稳定。界面之下的洼地是水流作用过程的汇流区，是溶、侵蚀作用下物质能量集中输运、转移地和堆积区，也是形态演变过程的快速区；而物质、能量输运转移主通道，即为地下管道系。因此，峰丛洼地是一种具有复杂双重结构的喀斯特地貌形态^[1](图 1)。在二维空间平面上，构成洼地分水线形成的封闭近 5~6 边形网络状(蜂巢状)结构。多边形的节结点，往往就是锥峰中心点所在位置，造成锥峰、洼地、垭口等关键地貌要素的错落有致的规则排列，并可随着地貌动力界面层的时空变化，锥峰或洼地中心点会由均匀分布向簇状分布和离散分布转变。在剖面上，就形成尖峰低谷(洼底)高频振荡的类周期谐波曲线。这种地貌上的平衡态有序结构即构成峰丛洼地与其他任何一类地貌不同的最基本特性，也成为研究和进行喀斯特地貌结构数量化分析的重要基础。



图 1 锥状喀斯特水文地貌结构模式(贵州)

Fig. 1 The hydrogeomorphological structural model of cone karst in the Guizhou

2 峰丛洼地形成的动力过程

2.1 强溶蚀动力过程

根据我国及世界其他地区锥状喀斯特分布来看，峰丛洼地的形成和发育是在三大主控因素耦合下的强溶蚀动力过程，即(1)物理强度高(高硬度、高抗压强度和低孔隙度)的大厚度碳酸盐岩分布和出露。这是保证支撑峰丛地貌形态耸峙的岩石构架基础。(2)是一个被抬升幅度超过水动型变幅(气候变化引起海平面垂直变化幅度，如冰期与间冰期的海平面变化幅度)的碳酸盐地块。这是保证在一定时间尺度内，内源水有足够作用的垂直渗流带厚度空间。(3)湿、热的气候带(气候形态阈值年均温 $>16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 $>1200\text{mm}$ ，地下径流模数 $>4.0\text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ ，生物 CO_2 份额 $>72\%$ ^[2])，这是保证强溶蚀动力和速率以及生物圈碳循环强度能连续进行的必须水、热环境因子。在此条件相互配合下，产生的高浓度 CO_2 ，在与碳循环密切相关的 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_3$ 三相不平衡开放系统下的快速反应和高强度溶蚀过程。

因为溶蚀速率决定于钙离子浓度与地下水流量,所以系统 CO_2 愈高,碳酸盐岩的溶解度 $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{ep}}$ 愈大,溶解愈快,使 CO_2 对方解石的溶解速率的影响可达 50% 以上^[3]。气温愈高,喀斯特作用速率也愈快,并且在温暖丰沛的降水环境条件下,溶蚀—沉积作用可以常年不间断地进行,这也保证了在一定的时间尺度(如以 $10^4 \sim 10^5$ 年冰期与间冰期时段)也能连续进行,而不会像干旱区和寒冷区,溶蚀作用是断续进行的。这实际上就意味着缩短了由微溶蚀裂隙被打开,发育到由流水侵蚀、溶蚀形成管道、洞穴的时间过程,也象征着相应地加强了峰丛洼地的物质能量输运过程和达到平衡态演化所需的时间,使洼地有更快的演化速率,从而在一个相对较短的时间尺度内,即能达到地貌过程与环境边界条件的协调,出现地貌动力平衡。据计算,发育成一个与峰丛相适应的配套洼地,在正常情况下,仅需要几十万年时间^[4,5],根据贵州峰丛洼地的研究证明,深洼地形成时代不早于中更新世^[6]。峰丛洼地溶蚀速率普遍高于其他气候区喀斯特地貌也得到证明(表 1)。

表 1 不同气候带喀斯特地貌溶蚀速率
Tab. 1 Solution rates of karst landforms in the different climate zone

地区	云南 ¹⁾ (7 个点平均)	贵州 (6 个点平均)	广西 ¹⁾ (15 个点平均)	山东 ²⁾ (鲁中)	山西 ²⁾ (晋北)
平均溶蚀量(mm/ka)	43.3	56.7	62.3*	29.9	10.1
气候带	中亚热带	中亚热带	南亚热带	暖温带	半干旱温带
年均温度(℃)	15.0	16.1	22.4	14.5	8.5
年雨量(mm)	1086	1360	1530	650	400

(1)据房金福、林钧枢等 1993 年资料;
(2)据张寿越等 1979 年资料
* 据周世英 1988 年对桂林地区峰丛洼地的溶蚀量测量计算为 64.86。

因此,在某种意义上讲,峰丛洼地也就是一种喀斯特生物气候形态,这便是它在全球分布上有一定的气候地带规律性的基本原因。

2.2 水动力过程

峰丛洼地形成的水动力过程并不是一个简单的水流渗透溶蚀过程,而是在一个地表、地下水耦合下的双重水文结构的强溶蚀—侵蚀动力过程;是在地表水网解体地下水系形成转化过程中的高速流场下的喀斯特水动力响应;是基面—径流—形态响应系统的阶段时态表现。因为在一个被抬升的碳酸盐地块,由于溶隙—地下管道的发育,便很难再形成和维持完整的地表水系。当地表水系退化为干谷系(地貌漏陷化开始)再到被多个洼地代替,每一洼地又逐渐形成为一个独立的集水域——独立闭流单元^[6]。当它代替地表水网时,其水文过程也意味着由外源水转变为内源水,造成特有的产汇流过程,此时,碳酸盐岩含水介质体的裂隙,特别是洼地底部主排水裂隙逐渐被扩大,在洼地边坡和底部形成地表流、壤中流、皮下水层流、垂直渗透流和竖井流,并随着喀斯特含水地块的介质结构的发展,水流的赋存形式和作用过程也多元化(见图 1)。由于各种水体主要存在于渗流带中,并以垂直渗流(快速流和慢速流)为主,所以当降水后,雨水会很快以坡流形式向洼地汇集并向下渗透,在地下水流方向上,各洼地排水系统之间又以管道相连,形成孔隙—裂隙流、溶隙流和管道流的有机联系,雨季当降水强度大,管隙排水不畅

时,又会造成短期洼地滞水,甚至会形成暂时性(季节性)的喀斯特湖,从而产生洪水的面状溶蚀作用和水文扩散效应对洼地的侧向拓展加深。

此外,由于皮下水是土层下基岩溶蚀裂隙带形成的一个在垂直渗流带中的水流侧向运移的表层悬挂饱水带,它的形成与发展是洼地形成演化的水动力基础。在大型张裂隙(节理或断层)处,水流可在重力作用下垂向渗透形成有明显流路的渗透流,并会因中心水面水动力梯度的加大形成有传导性和渗透性很强的聚合溶蚀中心,地面也会因此形成洼地(漏斗),漏斗一旦形成,正反馈响应又会加强洼地的发育。由于各个渗流聚集中心的水动力强度及其吸引范围不同,随着其向下垂直发育,势力强的聚流中心会袭夺周围势能弱的聚流中心,又强化了其水力传导性和渗透力(图 2),从而又加强了洼地的进一步扩大和加深,推动洼地的发展^[7]。国内外一些学者把锥状喀斯特的形成和发育与流水紧密相联,并视为流水喀斯特^[8,9]似应看作水文对锥状喀斯特作用成因研究的一次深化。



图 2 降水漏斗的形成与强渗流聚集中心袭夺态势

Fig. 2 The formation of drawdown cone and the capture state to the centre of drainage flow

2.3 地貌动力过程

峰丛洼地地貌动力过程,实质上就是在地貌双重结构下由高速流场驱动强溶、侵蚀作用下的一个向地貌动力平衡时态演化过程,也是地貌熵不断减少,从混沌向有序演化的一个耗散结构功能过程。

当高出侵蚀基面一定高度的碳酸盐岩含水介质地块——阶段时态地貌体,其水动力源逐步转为内源水占主导作用时,伴随着面状放射扩散流溶蚀锥峰面趋向圆锥化,使其形态成因指数向 1.5~3.0 集中^[10](表 2)。

表 2 典型峰丛洼地锥峰形态成因指数统计

Tab. 2 Morphometring statistics of cone hill of typical cluster depression

位置	水城				平塘		普定
海拔高度 (m)	法菁	双龙井	玉皇洞	卡罗	六洞	西凉	母猪洞
	2000	2100	1900	1000	900	850	1400
测量锥峰个数(个)	137	165	122	90	80	90	74
锥峰形态指数平均值	3. 01	2. 90	2. 91	2. 84	2. 54	3. 01	3. 03

万方数据

与此同时,有成生联系的负地形因水流汇集产生的强溶、侵蚀作用,由漏斗向深发育为洼地时,就在地貌形态结构上出现一个明显的地貌坡折,这就是垭口的所在位置。垭口相连也就构成了水文地貌动力界面。界面之上,是溶蚀作用相对均一缓慢,能表现出一定时间尺度内可脱离受控基面而独立存在,故能保持地貌几何形态不随流域地貌演化而变的动力平衡层。界面之下,是一个水流汇集的强溶、侵蚀作用区,形态快速变化的动力演化层^[11]。这个界面上、下两个不同形态动力层不仅为大量典型峰丛洼地的宏观空间分布所证实^[1,9,14],也为对峰林地貌结构的分形理论研究所证实^[12]。上层动力平衡石峰层与下层峰座形态演化层(洼地)分维值有明显的跳动(图 3),表明它们之间存在一个地貌内在阈值,是两个不同形态结构的动力界面。



图 3 峰丛洼地分形分维值反映的地貌结构临界

Fig. 3 Geomorphic threshold of karst showed by fractal dimension of peak cluster depression

由于洼地在一定的时间尺度内,外生阈相对稳定(构造变动、气候变化不超过临界),即使地貌作用过程与洼地一定的汇水面积、降水径流、地面坡度相协调均衡,使洼地系统的物质能量输入输出趋于平衡,洼地在二维空间上追求向最优化六边形结构演化。因为六边形是自然界中,形态最能填满空间,同时又是最能节省物质、能量的一种空间均衡组织形式。当峰丛洼地发育到这一阶段时,尽管洼地面积、边数、锥峰体积、坡度、相对高度、锥峰间距离都稳定不变,但物质能量流仍能进行,整个地势也在降低,然而其地貌的几何形态并不随时间的演进而变化。此时,也不出现如 W. M. Davis 的地貌循环理论所描述的那样:时间的进程被刻划在地形连续变化的几何形态上,从这个几何形态上即能正确无误地推断时间的进程,就像时钟指针的相对几何位置即可读出时间一样,去判定地貌发育年龄(阶段)^[13]。峰丛洼地的典型地貌结构出现,也正是标志着地貌演化阶段脱离时间而达平衡时的顶极时态表现。

由于锥峰的空间变化(锥峰的圆化、高度的蚀低、坡地的同时平行后退^[6])是与洼地的平坦底面积扩大互为依存,洼地底面积的扩大必然使锥峰体面积缩小,锥峰个数减少,并与界面动力层的降低,即洼地动力演化层垂直厚度的不断减薄同时进行,最后到达控制基面(如喀斯特潜水面),造成垭口界面、洼地底面、潜水面三者迭合。此时,也就象征着地貌内生阈的又一次突变,意味着峰丛洼地地貌阶段的结束,而代之而起的将是峰林盆地(溶原)的塔状喀斯特地貌阶

段演化发育。

3 峰丛洼地水资源开发利用方式

峰丛洼地岩溶水赋存特点主要表现为：地表水（河流）缺乏，有的在几十平方公里内无一条完整的常年流水的地表河；地下水以管道流为主，埋藏深，水的不均一性突出，水量大、流量相对稳定的岩溶大泉又常位于较低的位置或周边深切的峡谷中，利用不便；虽有多种赋存形式的岩溶水共存于复杂的地貌结构体中，但这些不同性质的水体由于其水量、水文动态过程的巨大差别，而形成迥然不同的可利用条件和开发价值。因此，如何根据峰丛洼地地貌结构和不同水源赋存特点采取因地制宜的有效开发利用方式就成为关键问题。在贵州，峰丛洼地岩溶水的开发利用的对象主要集中在地下管道流（特别是地下河）、降雨径流—坡面流、皮下水流和溶隙渗透流（裂隙泉），因此宜采用下列开发利用方式。

3.1 溶注成库

选择有一定规模（集雨面积）封闭性好的洼地，堵塞其地下排泄管道蓄水成库。成库的关键是查清其渗漏通道及其位置和进行工程处理的投资可行性评价。如贵州普定马官洼地—洞穴联合水库，即是利用冲头洼地（集水面积 0.47km^2 ），以洼底的一泥质岩隔水层防渗，又以人工渠道引入羊皮寨坡面流增大集雨面积 1.77km^2 ，从而使水库产水量达 $11.35 \times 10^5\text{m}^3$ 。另外查明洼地腰部发育有一短小溶洞通道，其最大洪峰流量 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ ，最枯时仅 $0.11/\text{s}$ ，且雨后 2~3 小时管洞中水即可排空，是蓄水后的主渗漏通道。但经对其进行堵洞防渗漏处理后，不仅不漏水，还可蓄水约 $0.14 \times 10^5\text{m}^3$ ，从而形成地表、地下联合水库。由于采取全封闭圆筒拱坝，投资省、工程量小，50 天即完工，当年受益，控制灌溉面积 333 余公顷。

3.2 堵洞成库

对位置优越（高于灌区和利用区）的地下河或伏流可在其出口洞段狭窄处堵坝形成地下水库，若为伏流也可在出口明流段筑坝使其上游洼地蓄水形成地表、地下联合水库。如贵州普定母猪洞（地下河）在洞口内修建封闭式堵水坝形成蓄水 10万 m^3 地下水库，修沿山渠道 1.5km ，可灌田 80ha 。工程投资少效益好。独山下司奋发洞于距地下河出口 55m 洞道处堵洞形成可蓄水 22万 m^3 的地下、地表（上游两个洼地）联合水库，可灌田 100ha ，成为饮水、灌溉的两用水库。

3.3 利用地下河天窗抽水

峰丛洼地的低洼地一般是地下河通过之地，其中常有落水洞、竖井天窗或漏斗与地下河相连，因此寻找这种直接与地下河相通的天窗抽水是最简易的利用方式。由于地下河埋深一般都在 $20\sim 80\text{m}$ 以上，因此要取得较高扬程，还需修建高水位蓄水池才能达到串连洼地自流灌溉。如长顺碑脚，利用马槽龙潭天窗抽水（提水扬程 20m ）仅能控制周围小范围灌溉，后再修建 56m 扬程高位蓄水池后，修建配套渠、管（道）可控制上、下洼地自流灌溉。提水总扬程也仅 80m 。

3.4 利用皮下水建池（窖）

在峰丛洼地坡地适当部位，寻找有皮下水带（有的有泉水出露）修建水池或水窖形成较有水源保证的自流蓄水池。窖位应选在皮下水位以下的部位，以保证有充足的水源入池。如作灌溉用水（不要求水质卫生达标）则可修拦山沟拦蓄降水坡面径流入池（窖），且可根据地形条件使多个水池通过管渠串连形成有调节功能的水池网络系统，以提高水池水利功能效益。

3.5 洪涝洼地排洪、发电

对有相当集雨面积的地下河连通的洪涝洼地,可以利用洼地间地下河的较大比降(水道集中落差)开凿排洪与发电引水两用渠道,在出口处用落差发电,做到既消除洼地洪涝灾害,又利用地下河水量水头发电。贵州长顺乌麻河水淹坝,即利用乌麻地下河在水淹坝与谷增坝的落差,开长 150m 的新水道(也是排洪道),并利用新水道排洪口 45m 的落差建装机 $2 \times 80\text{kW}$ 小水电站,利用闸门控制,平时发电,洪水时又排洪,从而既消除了水淹坝近 66 余公顷农田免遭洪涝灾害,又能利用水能发电、照明、农付产品加工,达到兴利除弊。

因此,对喀斯特水的不同赋存形式,必须因地制宜采取多种开发利用形式,这是解决峰丛洼地区地表缺水的关键。

4 结 语

(1)峰丛洼地是一种特定地质构造条件下的喀斯特气候形态类型,只发育在古、今湿热气候带,不存在全球每一碳酸盐岩出露区内都有分布的可能,因此脱离气候环境研究峰丛洼地形成过程是不可能揭示其发育内在实质关系的。

(2)对峰丛洼地的结构和动力过程分析研究证明,喀斯特地貌发育也存在着动力平衡态阶段,它不是地貌演化的终极,而是地貌演化在一定条件下即地貌内外阈值调控下所表现的一个地貌阶段时态。

(3)峰丛洼地是一类特殊的地表干旱缺水區,也形成了一种特殊的生态环境,但其间仍有利用价值不同的多元水赋存,因此,因地制宜采取多种开发利用形式是合理有效开发、利用水资源的關鍵。

参考文献:

- [1] 杨明德. 论热带喀斯特峰林地貌结构及演化特征[A]. 地貌过程与环境[C]. 地震出版社,1993.
- [2] Jakucs, L. Morphogenetics of Karst Regions, Budapest, 1977.
- [3] 刘再华,袁道先. 土壤中 CO_2 及其对溶蚀作用的驱动[J]. 水文地质工程地质, 1998(4).
- [4] White, W. B. Geomorphology and Hydrology of Carbonate Terrains[M]. Oxford University Press, 1988.
- [5] 房金福,林钧枢等. 喀斯特区现代溶蚀强度与环境的研究[J]. 地理学报, 1993(3).
- [6] 杨明德等. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 地质出版社, 1998.
- [7] Williams, P. W. Subcutaneous Hydrology and the Development of Doline and Cockpit Karst[J]. Z. Geomorph., 1985, 29(4).
- [8] Sweeting, M. M. Tectonics and Pluvial Denudation in the Formation of Cone Karst, with Particular Reference to South China, Tubinger Geographische Studine, H. 109. 1992.
- [9] 谭明. 喀斯特水文地貌学[M], 贵州人民出版社, 1993.
- [10] Xiong Kong-ning, Morphometry and Evolution of Fenglin Karst in the Shuicheng Area, Western Guizhou, China[J]. Z. Geomorph., 1992, 36(2).
- [11] 梁虹,杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统及其识别方法[J]. 中国岩溶, 1994(1).
- [12] 宋林华. 论峰丛地貌的双层结构与峰林地貌[A]. 喀斯特景观与洞穴旅游[C]. 中国环境科学出版社, 1993.
- [13] Davis, W. M. The Geographical Cycle[J]. Geog. Jour., 1899(14): 481~504.
- [14] 朱学稳,朱德有. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 地质出版社, 1988.

THE PROCESSES OF EVOLUTION DYNAMIC OF CONE KARST AND THE EXPLOITATION OF THE WATER RESOURCE

YANG Ming-de, LIANG Hong

(*Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China*)

Abstract: From the viewpoint of hydrogeomorphology, this paper analyses the cone karst climate-morphologic features in humid-tropic zone, the cone karst dual—structure which consists of cone hill equilibrium layer and depression dynamic evolution layer, and the geomorphologic evolution processes, and then discusses the pluralistic hydrologic occurrence characteristics relevant to autogenic water, and the exploitation methods of the water resources.

Key words: 万方数据 Cone karst; Evolution; Dynamic processes