

中国的喀斯特天坑及其科学与旅游价值

China's Karst Tiankeng and Its Value for Science and Tourism

朱学稳

(中国地质科学院岩溶地质研究所,所长、研究员 桂林 541004)

一、喀斯特形态与天坑

可溶性岩石,在其与天然水之间的物质、能量交换与循环过程中所形成的各种现象,便是喀斯特形态,可分为地表的和地下的两大类。属地表的主要有:溶沟、溶痕、石芽、石塔、天生桥、石林、峰林、峰丛(以上为正形态);落水洞、竖井、漏斗、洼地与盆地、坡立谷、喀斯特湖泊、槽谷与干谷、盲谷、峡谷、断头河、洞口、地下河出口、天窗以及泉水等等。地下喀斯特形态主要有:洞穴及其溶蚀形态、地下大厅、地下河、地下湖、伏流以及洞穴钟乳石类等。

以上数十种地表的及地下的喀斯特形态和现象均可查见于各种有关喀斯特著作、论文以及洞穴探险的各种文献与资料^[1,2,3]。而天坑则像一个初生的婴儿,只是在近几年被称作“大型喀斯特漏斗”和“very large doline”出现在少有的科学文献^[4,5]中。

“漏斗”是一种最具特征性的喀斯特形态和现象,其被引用几乎与喀斯特学具有同一的渊源与历史。漏斗起源于克罗地亚(Croatia)的亚得里亚海沿岸喀斯区一种叫 doline 的地形,系一种石灰岩坑或呈封闭漏斗状的小洼地,底部常有落水洞与之伴生,故有时难以将其与落水洞严格区别开来。在现代喀斯特漏斗的概念中,通常也把一种较小规模的基岩及覆盖层塌陷坑包含其中。而天坑的含意则可定义为:四围岩壁峭立(而不是任何形式的缓坡,且不包括后生改造),深度与平面宽度均不小于 50m 的地表陷坑。根据世界各地已发现的天坑规模的情况,为便于识别和资源的开发应用,可将天坑分为 3 个等级,即大型、中型和小型 3 类,如表 1 所示。其中深度及宽度均大于 200m 者称作超级或世界级规模的大型天坑。我国的小寨天坑(重庆奉节)和大石围天坑(广西乐业)等均属这一等级。由此可见,仅就形态与规模而言,天坑与漏斗便有重大区别,将天坑称作“大型漏斗”^[5,7]似乎有失科学的严谨性。此外,漏斗与天坑的区别或差异还表现在以下方面。

漏斗的形态,顾名思义主要为漏斗形,一般不具备陡峭的岩壁,口大底小,其深度多在几米至几十米。深度超过 100m、口部面积大于 1 万 m² 的漏斗,便是罕见的大型漏斗了。而大型天坑的规模则无与伦比,除深度均在 100m 以上外,其面积多大于

表 1 天坑规模分级

规模级别	深度(m)	口部宽度(m)	分布特征
超级或大型	≥200	≥200	主要分布在包气带厚度大于200米的峰丛区,地下河侵蚀溶蚀作用活跃
中型	≥100 ~ < 200	≥100 ~ < 200	分布在包气带厚度小于200米的浅峰丛及喀斯特丘陵区,或深峰丛区形成年代较早的天坑
小型	≥50 ~ < 100	≥50 ~ < 100	可分布在各类喀斯特地貌区。若与大、中型天坑伴生,其生成年代多数相对较早

10 万 m²,容积更在 1 000 万 m³ 以上。

在湿润喀斯特区,漏斗的分布极为普遍,我国南方的许多喀斯特区更是星罗棋布。而天坑在世界所有喀斯特分布区中却是凤毛麟角,极为罕见。

尤为重要的是,形成漏斗与天坑的喀斯特作用方式与形态过程存在很大的差别。代表性的喀斯特漏斗是由地表水通过落水洞的地下渗入和流入的过程中,在垂向和侧向上不断溶蚀扩大加深而形成;而天坑则与喀斯特地下水文网——地下河系统的强烈发育密切地联系在一起,绝大多数为塌陷成因,特殊条件下则由地面落水洞发展而形成。

喀斯特的另一种远不及漏斗分布那样普遍,但与天坑有某些类似的形态,被称作竖井。竖井是一种地面的垂向井状通道,一般直径是几米至一二十米,深几米至几十米。深度超 100m、直径超 50m 的竖井便是十分罕见的特大规模了。竖井多由落水洞的深化发育所形成,四围铅直,其空间在底部逐渐消失于含水层中。毫无疑问,天坑也应该在科学含义上与竖井严格区别开来。

另一种相似与相关的喀斯特形态是“地下河天窗”。这类天窗与地下河(或是早期的、遗弃的)直接相通,大多数系由地下河顶板局部塌陷并通达地表而形成,口径多在几米至数十米之内。在洞内外气温与气压差异条件下,常出现呼吸气现象,被称作“冒烟洞”、“吸气洞”。

以上讨论可知,天坑既不是“大型漏斗”也不是“超级竖井”,而应是喀斯特形态学中的一个新成

员。从目前的发现来看,我国可能是世界上天坑规模最大和数量最多的国家。中国特色的喀斯特除了峰林与峰丛地貌(桂林山水)、石林与地下河之外,便应该是“大天坑”了。根据科学上沿用的命名原则,“喀斯特天坑(karst tiankeng)”应成为正式的喀斯特形态学术语。

二、超大型天坑在我国的科学发现

从科学发现的意义讲,我国最早报道并解释天坑形成的记载,见于上世纪80年代前西南师范学院地理系的杨世^[6]有关四川兴文石林风景区的著作^[6]。该风景区内有两个深100~200m、面积16~20万m²、容积为1500~3600万m³的天坑小岩湾和大岩湾。但一直被作为喀斯特漏斗的特例而未予重视。1992年8月,由中国地质科学院岩溶地质研究所和中国地质学会洞穴研究会共同组织的第六次中英联合洞穴探险队,到该区进行了全面的科学考察和洞穴探测。在基本查明了区内地下河与洞穴系统的基础上,对与之有密切成因关系的小岩湾和大岩湾两个“大漏斗”给予了特别关注。探险结束后,英方考察人员 Tony waltham 博士便收集了世界上地表及地下具有巨大空间的大漏斗和大洞室资料,并一起发表于这次四川兴文洞穴探险的报告中^[5]。

1994年盛夏,笔者为在长江三峡西部寻找新的国际洞穴探险基地,意外地发现了奉节县的小寨天坑和云阳县的龙缸天坑。小寨天坑的规模是小岩湾天坑不可比拟的,所以引起了人们的极大注意与兴趣。于是从1994年至1999年间共组织了4次国际洞穴探险活动,基本查明了小寨天坑喀斯特水文地质系统的范围及其基本特征。此间,中、英双方都有正式论文与报告发表^[3,4]。

小寨天坑的科学发现,在新闻媒体传播下,其影响遍及我国南方广大的喀斯特地区。之后,陆续发现新天坑的新闻报道时有所闻。2000年6月笔者应邀到广西的乐业对大石围及其周边地区进行考察,再次证实大石围是一个规模与小寨天坑不相上下的巨型天坑,而天坑的周边约20km²的地区更有10多个较大规模的天坑群。于是“乐业大石围天坑群”便又一次名震天下,并被广西壮族自治区政府确定为“广西旅游跨上新台阶”的旅游开发目标。

2001年3月笔者又应邀到重庆市武隆的后坪乡考察,发现了又一个大型天坑,命名为“箐口漩坑”。它在成因上与以往所发现的塌陷天坑迥然不同,为世界天坑成因类型的多元化增加了新的例证。

三、喀斯特天坑的成因与分布

1. 天坑成因

就目前的发现及有关资料来看,形成于碳酸盐岩层中的喀斯特天坑共有两种成因类型,即塌陷型和冲蚀型。

(1) 塌陷型天坑

塌陷成因的喀斯特天坑是我国目前发现的最

主要类型,在数量上占有绝对多数,如小寨天坑、大石围天坑群、小岩湾天坑、龙缸天坑等等。塌陷天坑是由地下河强烈的溶蚀侵蚀作用导致岩层的不断崩塌并达到地表而成,其发展由地下到地面,并经历地下河洞道—地下崩塌大厅—地表天坑几个主要阶段(图1)。广西乐业白洞天坑与冒气洞地下大厅(图2)及大曹天坑与红玫瑰大厅(面积5.2万m²、容积700万m³)之间的关系均可作为例证。

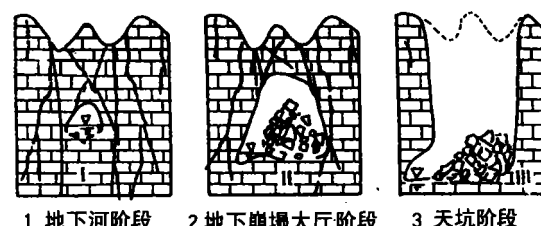


图1 塌陷天坑的形成阶段

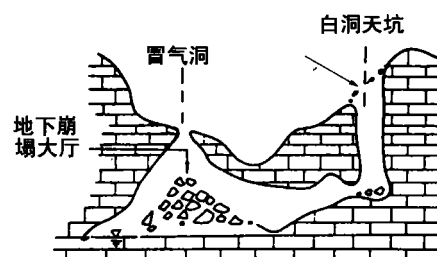


图2 白洞天坑与冒气洞地下大厅关系图

塌陷成因的天坑在形态与分布上有以下鉴别特征:鲜明的断崖和三角面绝壁,四周峭壁方向多受两组“X”节里面控制;天坑的平面图形为多边形,但总体呈椭圆或类圆形;坑底有大量的块碎石崩塌堆积物;天坑口部面积A与底部面积B之比值M随着年代的增加而增大,M值小于1是早年天坑的特征;天坑的出现与地表的地形和地貌形态无直接相关关系,即塌陷天坑可出现在干谷、洼地、峰坡、峰脊、峰间垭口或跨越几个不同地貌形态单位的任何地形地貌部位;天坑与地下河之间的结构为“串珠”式。

塌陷天坑的形成应具备以下必要条件:有连续沉积(不含5~10m厚度以上的非可溶岩夹层)厚度巨大的(大于200~300m)碳酸盐岩层,并有较广泛的连续出露与分布;岩层的水平至平缓产状,尤以宽平的背斜轴部最为有利;位置相对很低的排水基准面和含水层的包气带厚度在50~200m以上;温湿多雨的热带至亚热带气候条件;含水层中存在着物质、能量输入与输出功能强大的动力系统,即有溶蚀、侵蚀作用力强大的地下河系统发育。

(2) 冲蚀型天坑(落水洞式或盲谷式天坑)

冲蚀型天坑是在特殊的地质、地貌与水文条件下形成的一种落水洞式或盲谷式天坑。目前我们仅发现两例,其中在武隆县的后坪乡发现的边缘落水洞式天坑,发育条件比较特殊。后坪乡箐口天坑位

于武隆县东北与丰都县边界的长江与乌江分水岭上,海拔为 1 800~1 900 余米,与其南北面的长江和乌江有 1 600m 以上的相对落差。地形强烈切割,地貌为多层结构,早期的喀斯特干谷和高层洞穴与深切的峡谷不协调地分布在一起。天坑所在地层呈水平状态,最高处为二叠系 (P) 碳酸盐岩分布并发现有石林、洼地和地下河。其下为厚度巨大的志留系 (S) 砂页岩层,并被大面积蚀出地表,以斜坡地形为主。作为二叠系灰岩的下垫隔水层,不少地下河与泉水从地形高处即两类岩层出露的界线处流出,并作为形成箐口天坑的重要水源。志留系之下便是巨厚的寒武 (C)、奥陶系 (O) 碳酸盐岩层,并在地形相对较低的分水岭一侧广泛出露。由于当地的排水基准地面甚低,其含水层的包气带亦有 200~300m 以上的厚度。当分水岭地段上二叠系地层中的喀斯特地下水和志留系分布区的地表水流入寒武、奥陶灰岩边界时,便由地表渗入地下。由于该处地表与地下水存在巨大的动力落差,在侵蚀与溶蚀有力的双重协同作用下,最终形成了一个边界较一般塌陷天坑更为完整的天井式天坑,在其东侧的天坑绝壁上,形成了 2 层反映天坑分阶段加深过程的流入型洞穴大洞口。两层化石洞穴的长度分别为 1 800m 和 3 400m。而底层的现代排水道则为峡谷与裂隙形态,反映出近期地壳上升的强烈性质。箐口天坑结构如图 3。

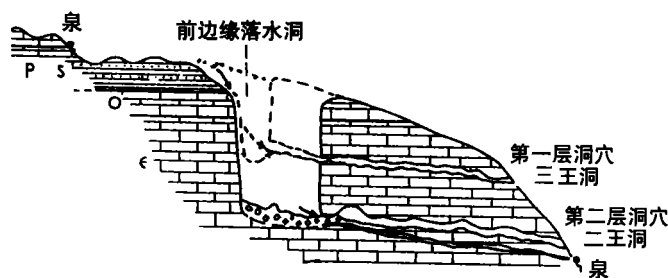


图 3 重庆武隆箐口冲蚀天坑结构图

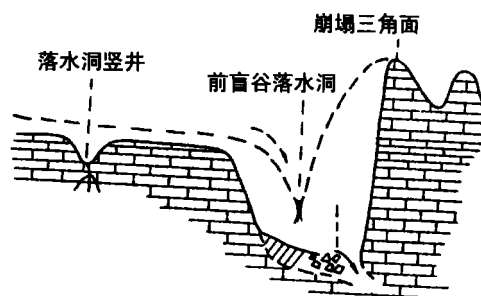


图 4 广西马山县龙岩天坑剖面图

另一种落水洞式天坑是在喀斯特盲谷末端落水洞基础上发育而成,故可称为盲谷落水洞式天坑,其形态欠完整,在横剖面上一侧有一个巨大的干谷缺口。此类天坑的扩大、崩塌作用也占重要地位,可有三角面山崖存在。如广西马山县的龙岩天坑 (图 4)。此类天坑成因应与马来西亚穆鲁 (Mulu) 公园中的 Garden of Eden 天坑一致或相近^[5]。

箐口落水洞型天坑的鉴别特征有:坑口为常态地形,无三角面断崖存在;天坑平面图形近圆形,较塌陷天坑规则;坑壁由悬瀑侵蚀而成,故岩壁铅直而完整;地下河不是从坑底横过 (塌陷型天坑),而是以坑底的供水为起源 (天坑与地下河结构为“烟斗式”,参见图 3);坑底缺乏大量的崩塌堆积物;坑口面积 A 与坑底面积 B 的比值 M 接近于 1;天坑总是发育在非喀斯特与喀斯特岩层出露的边界上。

其形成条件应具备:上部与下部有巨厚的非喀斯特化与喀斯特化岩层叠置结构并分别在上游与下游广泛出露;岩层在整体上呈水平至平缓状;下部喀斯特化岩层中存在 100~200m 厚度的含水层包气带;温湿多雨的热带与亚热带气候条件;有数十万年以上的地壳持续上升历史。

2. 天坑的分布

从天坑的基本特征及形成和发育条件可知,天坑主要分布在碳酸盐岩沉积厚度大、连续出露分布面积广、新构造运动大幅度抬升、喀斯特含水层包气带厚度大的喀斯特区。我国的长江三峡两岸和云贵高原南北两侧的广大地区均具备形成超大型天坑的必要条件,其范围涉及红水河流域、南北盘江流域、长江三峡、乌江流域和清江流域。这一地区出露有大面积的寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二

叠系和三叠系碳酸盐岩层,其沉积总厚度在 10 000m 以上。其中厚度在 500~1 000m 以上的,如三叠系的嘉陵江灰岩、二叠系的栖霞与茅口灰岩、石炭系的黄龙灰岩、泥盆系的融县灰岩和寒武系的娄山关灰岩等,出露分布均甚为普遍。这一地区第四纪以来大面积抬升,河谷深切,灰岩含水层的包气带厚度很大,喀斯特地下水循环激烈,地下河发育。著名的长江三峡就是在这个新构造抬升运动的背景下形成的,而大型天坑的形成,可说是其同源性生物。这一地区的地形主要是喀斯特峰丛 (洼地) 地貌,地形标高多在 800~1 500m 以上,与主要排水基面的落差则在 500~1 000m 以上。目前已发现的重要大中型喀斯特天坑有重庆市奉节县的小寨、云阳县的龙缸、武隆县的箐口、丰都县的大窝垞和小石院,彭水县的牛牵铺、四川兴文县的小岩湾和大岩湾,广西乐业县的大石围天坑群、马山县的龙岩等。中小型天坑在鄂西、湘西、湘东及其他一些地区的喀斯特丘陵及浅峰丛地貌区也陆续有所发现。表 2 列出了我国已发现的深度和宽度均大于 200 米的主要超大型天坑。

根据英国喀斯特学者 Tony waltham 博士的资料,目前世界上已发现的超级喀斯特天坑除我国外,还见于巴布亚新几内亚、马来西亚、墨西哥和克罗地亚等国 (表 3)。主要天坑的形态断面图如图 5 所示。

从表 2 和表 3 中可以看出,我国喀斯特天坑的数量之多、规模之大 (尤其在深度上)、分布面积之广,在世界上均是绝无仅有的。其中小寨天坑和大石围天坑的深度与容积,更居世界同类型天坑的第一、二位。毫无疑问,近年来我国发现的深度在

表 2 中国主要大型喀斯特天坑

天坑名称	地点	深度(m)	直径(m)	口部面积(m ²)	总容积(Mm ³)	成因	生态状况
小寨	重庆奉节兴隆镇	662	626~537	274 000	119.00	塌陷	破坏
冲天岩	重庆奉节兴隆镇	200	108~210	37 800	7.56	塌陷	良好
大石围	广西乐业县同乐镇	613	600~420	166 600	67.14	塌陷	良好
大坨	广西乐业县同乐镇	275	534~380	148 800	32.74	塌陷	较差
穿洞	广西乐业县同乐镇	312	370~270	73 000	12.78	塌陷	良好
邓家坨	广西乐业县同乐镇	278	470~370	120 000	23.93	塌陷	较差
神木	广西乐业县同乐镇	234	370~340	70 900	13.18	塌陷	良好
白洞	广西乐业县同乐镇	312	220~160	22 000	5.79	塌陷	良好
小岩湾	四川兴文县石林	248	425~475	200 000	40.00	塌陷	破坏
龙缸	重庆云阳清水乡	350	350~170	53 000	9.20	塌陷	良好
箐口	重庆武隆县后坪乡	210	200	31 400	6.60	冲蚀	破坏

600m 以上、四周石壁如削的小寨和大石围等天坑，应是集世界大天坑雄奇、壮丽与辉煌之最了。

四、天坑的科学及旅游价值

1. 天坑的科学价值

天坑是喀斯特作用所形成的一种规模最大的个体形态，是在漫长的地质历史中经过内外动力地质作用形成，具有稀缺性和不可再生性的地质（自然）遗产属性，在喀斯特及其相关科学的研究中无疑具有重大的科学价值。

(1) 天坑的形成表明当地喀斯特的物质、能量输入与输出作用特别强烈，因而应存在一个特殊的喀斯特形成动力系统与形成机制。

(2) 天坑的形成与喀斯特水文地质过程及喀斯特含水层的演化有着特别密切的相互关系。天坑形成机制及其分布与演化规律的研究，可能会导致人们对喀斯特含水层性质及演化过程认识的飞跃性发展。

(3) 天坑的研究，将有助于人们对喀斯特作用的基本性质，特别是溶蚀、侵蚀和崩塌作用的机制及其相互关系认识的深化与发展。

(4) 一个地区天坑群分布规律、形成阶段和年代研究，对该地区的第四纪地质史，特别是确定地壳上升运动的性质与速率具有重大意义。

(5) 大型天坑的坑内空间，是一个相对封闭的小世界，一个特殊的气候与生态环境系统，在生物学和生态学研究方面具有特殊的科学价值与意义。另一方面，在周边生态环境被严重破坏的情况下，更是幸存下来的一个可贵的生物基因库（如广西乐业）。

2. 天坑的旅游价值

天坑是一种自然奇观，并为喀斯特条件下所特有。它在世界的自然景观中，具有稀少、奇特、险峻、恢弘、壮丽、秀美、生态环境独特等一系列特殊的旅游观赏价值与感官属性。同时，天坑总是与洞穴、地下河、奇峰怪石等其他旅游资源共存于一体，因而无疑是一种特殊的超级旅游资源。各地天坑附近的

表 3 国外大型喀斯特天坑^[5]

名称	地点	深度(m)	直径(m)	口部面积(m ²)	容积(Mm ³)	备注
Garden of Eden	Sarawak(马来西亚)	200	1 200 × 800	750 000	150	只有 1/2 周边为陡壁，盲谷落水洞成因
Luse	New Britain(巴布亚新几内亚)	220	800 × 600	380 000	60	四周无峭崖，应属非典型天坑，但有密林
Myric	New Britain(巴布亚新几内亚)	420	300 × 300	70 000	26	植被稠密，四壁陡立
El Sotano	Mexico(墨西哥)	380	400 × 200	60 000	15	墨西哥最深的pit
Crveno Jezero	Croatia(克罗地亚)	> 220	400 × 400		32	坑底有湖泊

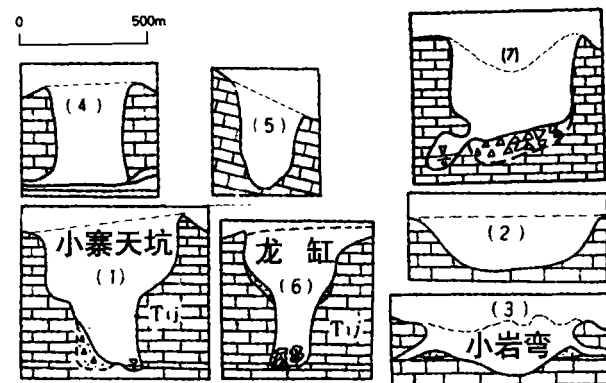


图 5 一些世界级大型天坑同一缩尺的横剖面

(1) 小寨 (2) Luse (3) 小岩湾 (4) Myric
(5) El Sotano (6) 龙缸 (7) 大石围

旅游资源组合、品级及生态环境现状等都会有所差别，其旅游价值也会有差异，但喀斯特天坑总是自然旅游资源中的一颗闪亮的明星。重庆小寨天坑已于 1999 年向游人开放，广西乐业大石围天坑群正在旅游开发规划之中。21 世纪，喀斯特天坑风景名胜区的，将为世界旅游业增添一个璀璨夺目的亮点。

参考文献

- [1] 袁道先主编. 岩溶学词典. 地质出版社, 1988
- [2] 朱学稳, 汪训一等. 桂林岩溶地貌与洞穴研究. 地质出版社, 1988
- [3] Cave and Karst Science BCRA Vol. 22 No. 2 1995
- [4] 朱学稳, 张元海. 四川南部大型喀斯特漏斗和地缝式峡谷. 中国岩溶, Vol. 14, 增刊, 1995
- [5] Tony waltham, Dave Brook and Simon Bottrell. The caves and karst of Xingwen, China. Cave Science BCRA Vol. 20 No. 3 1993
- [6] 杨世. 石海洞乡. 重庆出版社, 1989
- [7] Waltham A. C, The giant dolines of Xingwen, Geoger. Journ. 1995

(责任编辑 肖庆山)



广西乐业丛山峻岭之中的穿洞天坑(左上)



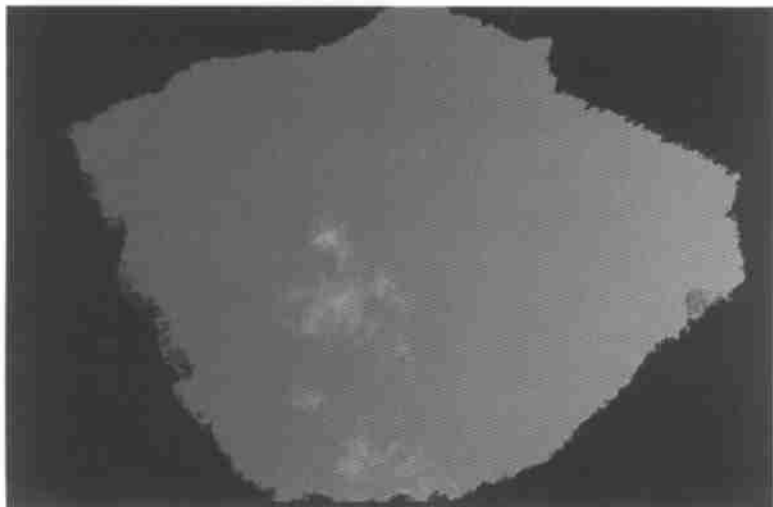
四川兴文县的小岩湾天坑



发育在长江南岸竹笋河支流左岸的云阳县龙缸天坑



龙缸天坑东侧与石笋河边岸间的崩塌岭脊



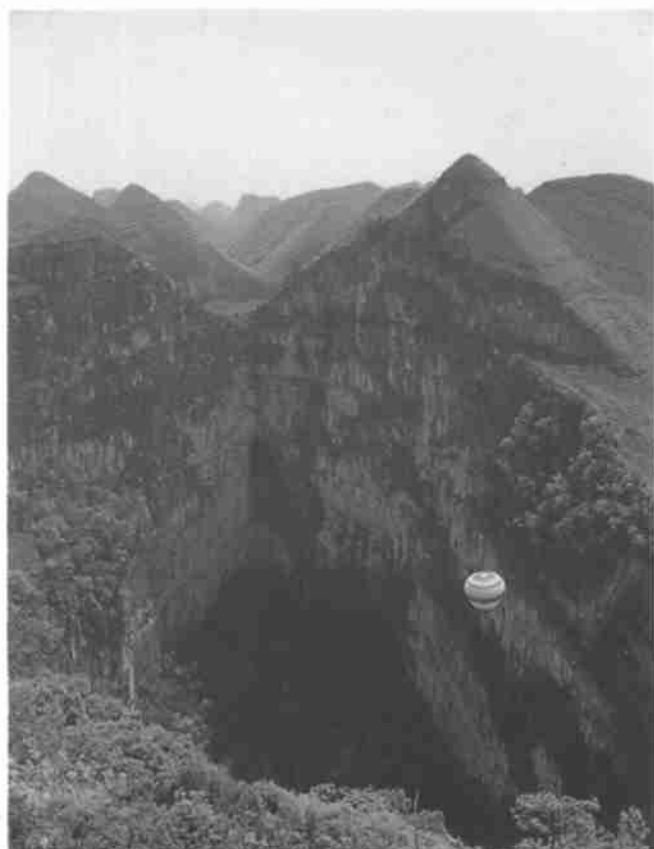
箐口天坑坑底观天

中国的喀斯特天坑

(见朱学稳文)



小寨天坑东面之崩塌三角面



大石围天坑坑底有着茂密的原始林植被

(本期全部彩照均由朱学稳拍摄)



2001年3月笔者新发现的冲蚀(落水洞式)天坑——重庆武隆县箐口天坑的筒状绝壁及悬挂瀑布(天坑第二种成因类型)

中国的喀斯特天坑

(见朱学稳文)



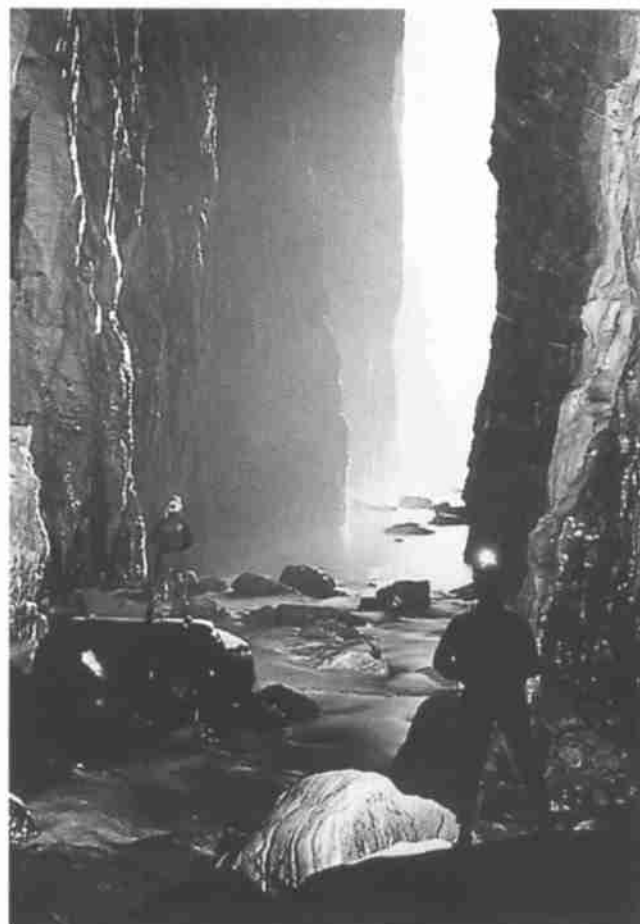
位于深峰丛洼地地貌区的广西乐业县大石围天坑



半边山(三角面峭崖)是天坑崩塌成因的直接证据(大石围)



从小寨天坑2/3深处观坑壁峭崖



小寨天坑坑底峡谷式地下河