

文章编号 :1001 - 4810(2003)01 - 0051 - 15

喀斯特天坑略论*

朱学稳,朱德浩,黄保健,陈伟海,张远海,韩道山

(中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶景观与洞穴旅游资源研究中心,广西桂林 541004)

摘要:上世纪80年代,人们知道我国四川省兴文县的石海洞乡(石林)风景区有个“小岩湾”的大型喀斯特漏斗,但多少年来并未引起喀斯特学术界的重视。近年来,随着这类喀斯特形态在我国南方喀斯特区的一系列重要科学发现,为我们对这一现象的一般性研究提供了机会。在初步研究的过程中我们认识到,应该将这类形态从大型漏斗中分离出来,并命名为“喀斯特天坑(karst tiankeng)”。本文是这一研究成果的初步小结,内容包括:国内外天坑的现有发现;喀斯特漏斗与天坑、天坑定义;天坑的成因类型、形成条件与发育阶段;天坑在科学研究及旅游资源开发中的意义。

关键词:喀斯特天坑;成因类型;形成条件;科学意义

中图分类号: P931.5 **文献标识码:** A

0 前言

喀斯特现象有各种生成形态的表现,其规模有大有小,空间分布有地表和地下,笔者(本文第一作者,下同)曾经给出的定义是: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以溶蚀作用为主导所形成的各种现象,便是喀斯特形态^[1]。分布于不同空间,已被科学家详细描述过的喀斯特形态不下百余种,像溶沟、石牙、石林、落水洞、漏斗、竖井、封闭洼地、干谷、槽谷、盲谷、天生桥、峰林、峰丛、洞穴、地下河、波痕、窝穴以及各类钟乳石等已为大多数人们所熟悉。近年来,在我国广泛开发利用喀斯特旅游资源和国际联合洞穴探险频繁活动的形势下,喀斯特形态中规模最大的一种类型——天坑,在我国南方不断被发现,并为新闻媒体广泛传播。

1992年,笔者与英国学者 Tony waltham 博士合作,较深入地对四川省兴文县的“小岩湾”、“大岩湾”进行了研究,在双方发表的论文中,均将这一形态称作“塌陷漏斗(Collapse Doline or Collapse-Sinkholes)”,巨型坑(big holes)及世界级规模的大漏斗(World class doline)等^[25]。在其后的近十年中,随着天坑在我国的不断发现,特别是广西乐业大石围天坑群及重庆市

武隆天坑群详查工作的完成,武隆后坪地表水冲蚀型天坑的发现,笔者对这一现象便逐步有了一些新的认识,于是在2001年10月发表了“中国的喀斯特天坑及其科学与旅游价值”一文,首次提出将“天坑”从“大型漏斗”中分离出来,并成为喀斯特形态学中的一个新成员——“喀斯特天坑(karst tiankeng)”^[1]。Tony waltham 博士对这一提议十分关注,曾多次与笔者交换资料与意见,并打算将“karst tiankeng”一词编入大百科全书中,但他对这一喀斯特形态成因的认识尚疑惑不定,指出:“天坑仅仅是大型的普通漏斗,或假设它们是漏斗形成不同机制的表现。”一句话,这是一种可独立命名的喀斯特天坑,还是一种大型的普通喀斯特漏斗?笔者的初步认识与主张是前者,也正是本文所讨论的主要内容。

1 国内外“大型喀斯特漏斗(天坑)的现有发现

漏斗是典型喀斯特区的一种司空见惯、极其普遍的喀斯特形态。所谓大型、特大型或世界规模的大漏斗,只是在近十年中,特别是近年来在我国重庆奉节和武隆、云阳及广西乐业、巴马等地的一系列科学发现后才引起了人们的关注。在此之前,四川兴文县石

* 作者简介:朱学稳(1932-)男,研究员,现任中国地质学会洞穴研究会会长,水文地质和岩溶学专业。

林风景区的“小岩湾”和“大岩湾”也一直作为一般的“塌陷漏斗”看待。在国外,如巴布亚新几内亚、马来西亚、墨西哥、克罗地亚等地,这类“大漏斗”也有所发现,而且似乎也没有被“另眼看待”过。

表 1 重庆市奉节兴隆镇天坑

Tab.1 Karst tiangkeng group in Xinglong Small Town, Fengjie County, Chongqing City

名称	口部直径 (m)	口部面积 (m ²)	最大深度 (m)	总容积 (M m ³)	成因类型
小寨	626537	274000	662	119.35	塌陷
冲天岩	300160	41500	168.4	6.99	塌陷
箩筐岩	135100	10800	101	1.10	塌陷
伍家寨	200150	24000	103.4	2.49	塌陷
猴子石	12380	8100	107	0.86	塌陷
硝坑	328180	45000	286.3	12.00	塌陷
大青坑	220150	8000	137.3	1.10	塌陷

(据岩溶地质研究所“奉节县天坑地缝风景名胜地区地质科学考察报告”2001年10月)

1994年,奉节县小寨天坑的科学发现是一个重要的起点。继之,于2000年,广西乐业县发现了大石围天坑群。2001年3月,在武隆县发现成因起源于地面水流的冲蚀型天坑群。2002年底,广西巴马县

的号龙天坑和交乐天坑被确认。根据我们近几年的调查研究工作报告,国内主要天坑及形态特征的有关数据如表1、2、3、4。十分有趣的是,目前发现的重要天坑主要分布在具有深切特征的长江南岸(右岸)和赤水河南岸(右岸),如图1。

表 2 重庆市武隆县天坑

Tab.2 Karst tiangkeng group in Wulong County, Chongqing City

名称	口部直径 (m)	口部面积 (m ²)	最大深度 (m)	总容积 (M m ³)	成因类型
中石院	697555	278200	213.7	34.78	塌陷
下石院	1000545	352064	373.0	31.47	塌陷
青龙	522198	193975	275.7	31.67	塌陷
神鹰	300	51226	284.7	9.73	塌陷
迷洞	246220	19320	208	4.93	塌陷
箐口	250220	40754	295.3	9.21	冲蚀
石王洞	170140	25896	252.5	5.13	冲蚀
打锣凼	240220	32405	370	10.4	冲蚀
天平庙	180	26376	420	9.89	冲蚀
牛鼻洞	38080	26670	198.8	3.47	冲蚀

(据岩溶地质研究所“重庆武隆岩溶地质公园综合考察报告”2002年9月)

表 3 广西乐业县天坑

Tab.3 Karst tiangkeng group in Leye County, Guangxi Province

名称	口部直径(m)	口部面积(m ²)	最大深度(m)	总容积(M m ³)	成因类型	注
大石围	600420	96200	613	67.14	塌陷	
大坨	534380	108000	290	32.74	塌陷	
邓家坨	470370	10700	278	26.19	塌陷	
神林	370340	70900	234	13.17	塌陷	
吊井	390280	86300	169	12.6	塌陷	
穿洞	370270	30000	312	9.01	塌陷	
老屋基	300275	75600	171	8.31	塌陷	
黄鲸	3202170	38200	161	6.29	塌陷	
白洞	220160	22000	312	5.78	塌陷	
香铛	310230	45000	143	3.60	塌陷	
拉洞	202127	21600	215	2.81	塌陷	
苏家	244134	23700	167	2.63	塌陷	
燕子	10060	14340	250	1.69	塌陷	倒置漏斗状
甲蒙	9080	8800	271	1.58	塌陷	
龙坨	210175	14400	115	1.36	塌陷	
大曹	300140	15600	92	1.27	塌陷	
里郎	29080	17500	111	0.89	塌陷	
大洞	11782	8800	194	0.89	塌陷	
罗蒙	140100		128	0.72	塌陷	
棕竹洞	142120	12100	87	0.61	塌陷	
兰家湾	150117	8800	130	0.61	塌陷	
盖帽	7055	3100	100	0.25	塌陷	
打拢	240200	35000	125	0.33	塌陷	
达记	8361	4500	90	0.39	塌陷	倒置漏斗状

(据岩溶地质研究所“广西乐业县旅游资源调查、评价暨大石围等重点旅游资源初步规划设计”2002年9月)

表 4 我国其它地区的重要天坑

Tab.4 Main karst tiankengs in other area of China

名称	位置	口部直径(m)	最大深度(m)	容积(M m ³)	成因
小岩湾	四川兴文县石林风景区	425475	248	40.00	塌陷
大岩湾	四川兴文县石林风景区	680280	110	15.0	塌陷
号龙	广西巴马县	800600	503	113.7	塌陷
交乐	广西巴马县	750400	326	63.0	塌陷

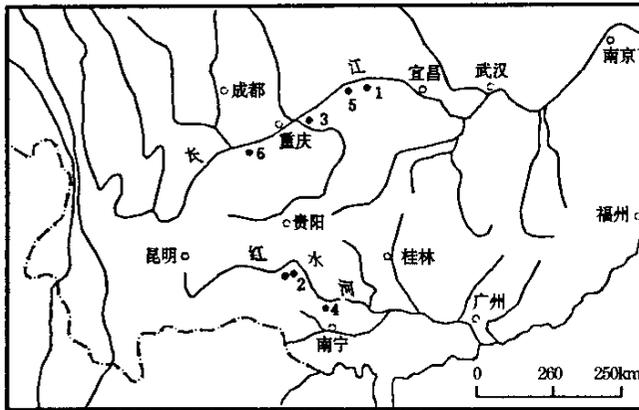


图 1 中国南方天坑分布图

Fig.1 Distribution map of karst tiankeng in South China

1. 奉节小寨天坑 2. 乐业大石围天坑群 3. 重庆武隆天坑群及箐口天坑 4. 广西巴马号龙、交乐天坑；
5. 重庆云阳龙缸天坑 6. 四川兴文大岩湾及小岩湾天坑

在以上 45 个天坑中,最大深度在 500m 以上,坑体容积超过 50Mm³ 的特大型天坑,只有奉节的小寨、乐业的大石围和巴马的号龙三个天坑,绝大多数为中小型。毫无疑问,在我国广大喀斯特地区,特别是南方大片的峰丛区和具备岩层厚度大、地下水位埋藏深等基本条件的地区,还可能将会有更多的天坑,特别是中小型天坑被发现。

目前,国外天坑方面的资料甚少。根据网上查询及 Tony waltham 和 Mladen GARASIC 等资料,被称为“大型喀斯特漏斗”的,主要见于巴布亚新几内亚的新不列颠岛、马来西亚的沙捞越、墨西哥地中海沿岸和意大利南部的 Gorgano 及 Murge 高原等地(表 5)。鉴于我们提出的“喀斯特天坑”与“大型喀斯特漏斗”之间,在形态特征、形成条件等方面可能存在着某些差异,现阶段难以对国外的这类形态予以确切鉴别。例如“Garden of Eden”形成于灰岩和页岩接触带上,周边仅有 1/2 的陡崖,可能系外源水冲蚀而成,而非成因于塌陷。又如“Luse”虽规模巨大,但周边无绝崖,可能是真正的“大型漏斗”。但如笔者亲临现场考察

过的澳大利亚 Nullarbor 平原南部沿海岸第三系灰岩中的一系列陷坑,则应属于一般性的塌陷漏斗^[6]。

2 大型漏斗与天坑、天坑定义与意义

2.1 大型漏斗与天坑

漏斗(doline)是一种最普遍和最具特征性的喀斯特形态。顾名思义,其形状为漏斗状或碟状,底部有地表水入渗点或落水洞。漏斗起源于克罗地亚(Croatia)亚得里亚海(Adriatic sea)沿海喀斯特地区一种叫“doline”的地形,主要是由地表水在地面分散入渗溶蚀而成,并成为喀斯特地形的一种最具鉴别性的特征。此外,人们把多种与喀斯特作用有联系的类似地形也称作漏斗,故有溶蚀漏斗、塌陷漏斗、渗透漏斗、潜蚀漏斗和溶解-雪蚀漏斗等漏斗成因类型的划分^[7]。其中以溶蚀漏斗和塌陷漏斗最为常见。塌陷漏斗有基岩塌陷和覆盖层塌陷两类。就形态特征而言又可分碟状、漏斗状以及陷坑状(竖井状)三种。在陷坑状漏斗中,有一种直径和深度均达到数百米,容

积在几千万至1亿 m^3 以上的“特大型”或“世界级规模”的“漏斗”,而这种“特大型漏斗”多被称为“塌陷漏斗”,即它们似乎只有一种塌陷成因类型^[4]。长期以来,由于这种特大型漏斗被发现的数量甚少,一些重要的喀斯特分布国家几乎找不到其踪迹,即使有所发现,也未引起人们的重视。从上世纪80年代以来,笔者有机会领导多次中外洞穴探险活动,先后在四川兴文县、重庆奉节县、云阳县和武隆县,广西的乐业县、巴马县等区域发现了一系列大型漏斗群分布区。大石围天坑群的发现,更向我们展示出大型塌陷漏斗形成阶段和发育史的一幅历史画卷。武隆箐口漏斗群的发现,为这类大型漏斗除塌陷以外的另一种成因类型提供了实例。随着我们对“大型漏斗”性质的更多了解,一种要把这类大型漏斗与一般塌陷漏斗区别开来的认识便由此产生,这就是笔者于2001年10月发

表“中国的喀斯特天坑及其科学与旅游价值”一文的起因。该文把这类大型漏斗命名为“天坑”,并简单地定义为“四周岩壁峭立(而不是任何形式的缓坡,但不包括后生改造),深度与平面宽度均不小于50m的地表陷坑”。同时按尺寸规模把天坑划分为大型、中型和小型三类^[1]。文章发表后,认可、疑惑及非议者均有之。地球科学是一门探索性很强的科学,而且只有一个多世纪的发展史。岩溶学是较地球科学更为年轻的科学,许多相关的岩溶现象尚处于不断发现之中。人们对每一发现的不同认识是自然的。对天坑来说目前的研究尚处于初始阶段,当更无例外。笔者提议将上述一类“大型漏斗”从一般漏斗中分离出来,并命名为“喀斯特天坑(karst tiankeng)”的见解与缘由如下:

表5 国外主要大型喀斯特漏斗
Tab.5 Main great karst doline abroad

名称	国家与地点	口部直径 (m)	口部面积 (m^2)	深度 (m)	容积 (Mm^3)	注
Garden of Eden	Mulu, sarawak , Malay sia	1200800	750000	200	150	周边仅 1/2 为陡壁,上部灰岩,下垫页岩底部水平洞穴(Deer 和 Green)
Luse	Nakanai Mt. New Britain P. N. Guinea	800600	380000	220	60	周边无陡崖,底部厚层堆积物有落水洞,植被茂密
Minye	Nakanai Mt. New Britain P. N. Guinea	300	70000	420	26	底部有洞穴,植被茂密
Elsotano	Mexico	400200	60000	380	15	墨西哥最深的坑
Golondrinas	Mexico			376		有壮观的绝壁
Grveno Jezero (Red Lake)	Dinaric , Croatia	200280	56000	528	30	积水成湖,水容积 $16Mm^3$,水深 281m,湖底海拔 -6m,坑内多洞穴
Pozzatina	Gorgano Italy	675440		130	16	底部种植,有竖井
Pres pueblos Hole	Rio camuy	150		120		底部有地下河

(据 Tony. waltham[4.5] and Mladen GARASIC[8])

(1)天坑的形成必须具备特殊的地质—地貌—水文地质为一体的系统条件(详见后文),而一般漏斗的形成条件则非常普遍化。故在全球喀斯特区域中,普通漏斗(含一般的塌陷漏斗)的分布非常广泛,而天坑则凤毛麟角,十分罕有。

(2)在形态方面,天坑以规模巨大、形态特色突出而区别于一般的任何漏斗。天坑的容积在 $1 \times 10^5 m^3$ 以上,巨型者更超过 $1 \times 10^8 m^3$ 。口部或底部面积在 1×10^3 至 $1 \times 10^6 m^2$ 之间,四壁岩石峭立,深度百米至数百米以

上。在这一方面,天坑对于一般的漏斗,是“鹤立鸡群”了。

(3)量变导致质变是事物运动的一般性原理,天坑与漏斗之间既有量的差异,更存在质的差别。初步的研究表明,在天坑形成与地下河之间的关系,天坑在水文地质流域内的分布规律,天坑与含水层性质及其演化之间的关系以及天坑与喀斯特发育年代、发育速度等一系列喀斯特科学问题方面的重大意义与地位,都是一般的喀斯特漏斗所不可代替、不可比拟的。

因此,天坑并不是一种大型或特大型的普通漏斗或竖井。正如人们所了解的,自然界中诸多事物的生成与发展多有相互间的联系,何况是同一的喀斯特现象呢!漏斗与竖井虽然可能与天坑有成因或发育阶段上的耦合关系,但绝非所有的或相当一部分的漏斗或竖井都会发展成为天坑。这一事实本身就说明,两者之间的性质与特征存在本质性的差异。

2.2 天坑定义与意义

根据以上讨论,笔者初步提出的“喀斯特天坑(karst tiankeng)”的定义是:“发育在碳酸盐岩层中,从地下通向地面,四周岩壁峭立、深度与平面宽度(口部或底部)从百米至数百米以上,底部与其发育期的地下河连接的陷坑状负地形。天坑的生成与重要的喀斯特水动力系统密切地联系在一起。主要分布于碳

酸盐岩层连续沉积厚度及其包气带厚度均特别大(地下水位深埋)、地下河与洞穴又非常发育的喀斯特山区,在我国南方,主要分布在峰丛洼地喀斯特山区。如奉节的小寨天坑、乐业的大石围天坑、武隆的箐口天坑、巴马的交乐天坑等(图 2)。在旅游观赏方面,是否具有稀有、雄奇、险峻、壮观、生态环境独特等综合属性,也应被认为是鉴别天坑与一般的漏斗或竖井的重要依据之一。当然,天坑更是洞穴探险家和广大洞穴爱好者最佳的活动场所。根据世界上现有的发现,天坑的规模可划分为特、大、中、小四个等级,如表 6。特级天坑在全球极其稀有,其数量屈指可数,在我国目前的发现中只有小寨、大石围和号龙三例,国外更是凤毛麟角。大型天坑亦属十分罕见。数量较多的是中、小型规模的天坑。

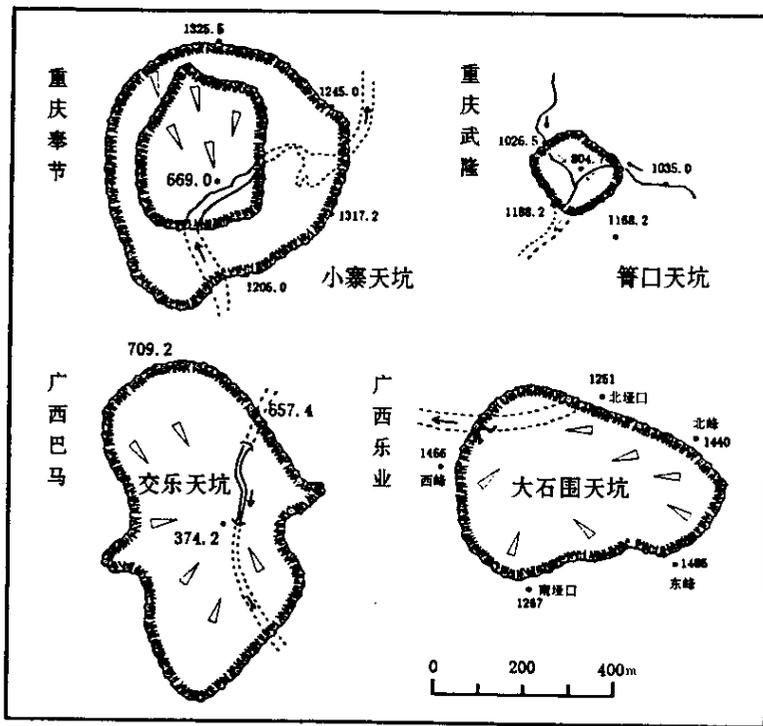


图 2 天坑与地下水道关系

Fig.2 Relationship between tiankeng and subterranean stream

表 6 天坑规模的级别划分

Tab.6 Scale classification of karst tiankeng

规模级别	最大深度(m)	口部或坑底最大直径(m)	容积(Mm ³)	分布特征
特超级	≥500	≥500	50	极其稀有
大型	300500	300500	1050	稀有
中型	100300	100300	110	少见
小型	<100≥40	<100≥40	<1	较少见

3 天坑的成因类型、形成条件和发育阶段

就目前的发现和初步的研究结果来看,形成于碳酸盐岩层中的喀斯特天坑有两种成因类型:即起源于地下水流溶蚀崩塌作用的塌陷型和起源于地面水流溶蚀冲蚀作用的冲蚀型。

3.1 塌陷型天坑

3.1.1 塌陷天坑成因及其鉴别特征

塌陷天坑,系指碳酸盐岩层的溶蚀侵蚀集中发生在地下深处,大量的物质为强大的地下水动力系统(主要是地下河道)所输出,渐进式崩塌,作用间断而不止,直至整个地下空间出露于地表而形成。塌陷天坑有以下鉴别特征:

(1)塌陷天坑在地面的出现,与地表各种喀斯特形态及地形无直接内在联系,即天坑可分布在洼地、干谷、丘坡、丘顶等任何地形部位,并“毫无顾忌”地切割、破坏地面的任何喀斯特形态与地形。因此塌陷天坑是否具有险峻雄奇的气势,不但与其规模大小有关,还取决于其所在的地形部位。位于大型干谷或洼地中的天坑,即使是具有巨大的规模,也会是气势平平,如广西巴马的号龙天坑。

(2)坑口周边地形起伏大。尤其是当天坑周壁扩

展至锥状山丘时,每每出现三角面峭崖,并常常成为崩塌天坑最醒目的标志。

(3)塌陷天坑出现于地表之后处于不同的发展时期有不同的形态特征。一般情况是,早期是倒置漏斗形,底面积大于口部面积;中期是井筒状,四壁峭立,顶底面积相若;晚期经改造、破坏,周壁欠完整,口部面积大于底面积。

(4)周壁峭崖欠稳定及坑底多有大量崩积物(碎块石为主)也是大多数塌陷天坑的重要特征。塌陷天坑正常发育过程的中止(由地下物质与能量输出系统的迁移造成)将导致坑底崩塌堆积的积累、加厚和天坑深度的减小。

(5)有一条从天坑底部横过的地下河道,或是现阶段地下水道已迁移,仅留下曾经是地下河道的化石洞穴(这类洞穴多可发现河床冲积物堆积层)。但某些崩塌堆积层甚厚的天坑,可能将其全部堵塞与覆盖。据我国的现有发现,对于超级和大型天坑来说,这一特征均十分显著。

塌陷成因的天坑,无论在国内及国外都是天坑成因中最主要和在数量上占绝对优胜的一种类型。如我国的小寨天坑群、大石围天坑群、号龙、交乐、大岩湾、小岩湾、龙缸等天坑。国外如巴布亚新几内亚的Mynic,墨西哥的El sotano等(图3)。

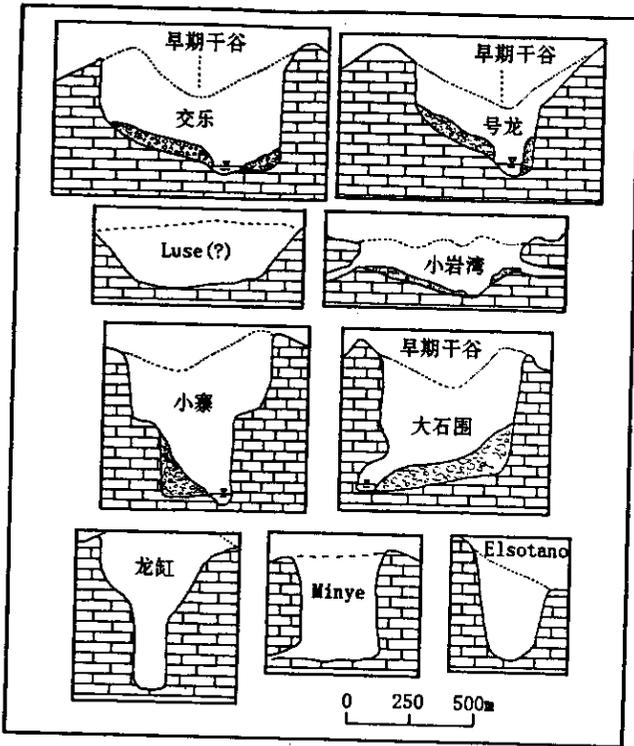


图3 国内外主要塌陷天坑的剖面图

Fig.3 Profile map of main karst tiankeng at home and abroad

3.1.2 塌陷天坑形成条件

根据大石围、小寨、小岩湾、龙缸、号龙和交乐等30多个塌陷天坑的初步研究,其必须具备的形成条件有:

(1) 连续沉积厚度巨大的碳酸盐岩层

已发现天坑发育的地层有三叠系嘉陵江组(小寨、龙缸、中石院、下石院等天坑)、二叠系的栖霞组和茅口组(大岩湾、小岩湾等天坑)、石炭系和泥盆系(大石围天坑群、号龙、交乐等天坑)。在我国南方的桂、黔、川、渝、滇、湘诸省(市、区),从泥盆系至三叠系碳酸盐岩沉积地层占主导地位,沉积厚度在数百米至千米以上。其间少有重要的不透水夹层。而厚度在2-3km以上的不同时代碳酸盐岩层沉积组合,在天坑发育区多可见到。岩性以纯灰岩、白云质灰岩为主,夹部分白云岩或灰质白云岩,厚层、块状或中厚层状。总之,厚层块状、质地较纯、连续沉积厚度在数百至千米以上的碳酸盐岩层,是天坑形成与发育必备的物质基础。

(2) 碳酸盐岩层中形成厚度相当大的包气带

凡天坑所在地的碳酸盐岩中,均是地下水位深埋,喀斯特含水层包气带的厚度接近或大于天坑的最大深度。地壳的抬升,地表河谷的深切,含水层地下水位与其排水基面之间落差大,是形成这一水文地质特征的基本动力与原因。第四纪以来,云贵高原大幅度抬升,地表河流的强烈溯源侵蚀与深切,导致碳酸盐岩层中地下水位的不断下降,形成目前厚度很大的包气带。现阶段,在云贵高原的边缘地带以及长江三峡两岸,这一作用表现尤为显著,也是我国天坑的重要分布区。

(3) 岩层产状平缓及断裂发育的地质构造条件

已发现的天坑无不具有所在地层产状平缓的特点,层理的倾角多在 15° 以内。不少天坑更发育在平缓背斜的轴部(小寨、龙缸、大石围等)。处于水平至平缓产状的碳酸盐岩层,在地质构造应力作用下产生的垂直层理并切割很深的“x”型节理裂隙,既有利于岩层中地下河的深层发育,又易于形成岩层的脱顶塌落及断裂绝崖和天坑椭圆至多边形平面图形的形成。产状平缓的岩层,可造成碳酸盐岩层的大面积出露与分布,这又为天坑发育所必须具备的、作用集中而强大的喀斯特水动力系统的形成奠定了基础。

岩层的透水性是喀斯特作用的重要条件之一。碳酸盐岩(除波多黎各、澳大利亚、古巴等地的第三系孔隙性大的岩层)的透水性,除沉积层理外,主要决定于地质构造作用对其造成的破坏程度。地下强大的水动力带的形成和大规模崩塌作用的发生,都必须以岩层一定的断裂、节理发育程度为基础。据此,我们

特别注意到,广西乐业大石围天坑群之所以集中分布在乐业呈“S”型构造中部的扭转部位,地质构造的特殊性显然是决定性的因素(见后文)。

(4) 高强度水动力作用(溶蚀与侵蚀)的地下河的存在与发育

天坑是喀斯特形态中规模最大的负形态之一,因此必须有一个强有力的物质与能量输入与输出动力系统与之相伴,这个动力系统便是在碳酸盐岩层内部集中运动的地下水流,即地下河系统。凡天坑多有百万、千万以至亿立方米容积的空间,没有一条具“高速公路”式运载力的地下河将其物质不断输出,天坑的形成是难以想象的。因此可以说,凡天坑均起源于相应的地下河的发育。大石围、小寨、号龙、交乐等超大型天坑的底部都有地下河的直接露头。但一些规模较小、相对位置较高的天坑,则常常难以寻得与地下河的直接联系。坑底为厚层的崩积物所覆盖是可能的原因之一,但更重要的是这类天坑的形成年代往往相对较早,地下水道已经迁移,故道已被堵塞。据此原理,在一条地下河系统中,可从天坑群的分布关系来研究地下河行迹的变迁和演化过程,从而更深刻地认识当地喀斯特含水层的基本性质与特征。当然,如果是落水洞或一般的竖井,而不是名符其实的天坑,便不存在它们与地下河之间如此密切的关系了。

(5) 气候与水文条件

湿润多雨的气候所提供的丰沛降水量,是喀斯特作用中物质、能量交换与循环的基本动力。600-800mm的年平均降水量,对于形成天坑的喀斯特作用强度和地下河的发育来说,都可能是最低门限值。上述各天坑分布区的年均降雨量均在1200-1900mm区间,对于天坑的形成来说,这样的降水量所形成的地下水量应是足够丰沛的。枯、丰期分明,水流坡陡流急和多有外源水流入,是我国南方喀斯特区水文条件的重要特征。这三方面的水文特性,均是加强喀斯特作用和有利于天坑形成的重要因素。这可能是我国南方天坑特别发育的一个重要原因。水的运动状态与流速及外源水因素在加强喀斯特作用方面的意义,人们已有一定的了解。但在对我国南方峰丛每年都要多次发生的突发洪水,其暴涨暴落的特性(数小时内水位、水量可产生数十倍至百倍的变幅)在喀斯特作用上(地下河及其天窗和天坑的形成等)的意义与实际影响,目前很可能仍处于相当低估的认识阶段。

3.2 冲蚀天坑的成因及形成条件

3.2.1 冲蚀天坑成因、与塌陷天坑的差异及其鉴别特征

顾名思义,冲蚀天坑是由地表水流(主要属外源

水)的集中冲蚀(侵蚀)与溶蚀作用形成的天坑。流入坑内并注入含水层的集中水流,理所当然地也会引起地下河的形成,但冲蚀天坑底部的地下河结构与性质与塌陷天坑比较是有重大差别的。冲蚀天坑本身就是地下河的发源地,在坑底形成“流入型”洞穴,洞口(地下河流入口)规模往往很大,并向内部逐渐减缩。而塌陷天坑底部的地下河则是“过境河”,天坑是地下河的“天窗”。此外,在喀斯特的形成作用上,两者也有重要区别。如前已指出,塌陷天坑的成因起源于喀斯特地下水(地下河流)的溶蚀、侵蚀与崩塌作用,冲蚀天坑的成因是由地表水(地表溪流)的冲蚀(侵蚀)与溶蚀形成。对于天坑大容积的形成来说,前者,溶蚀与侵蚀作用是起因,而崩塌或塌陷作用则是主导;后者侵蚀(冲蚀)与溶蚀作用既是起因,也是主导,而塌陷作用只是偶而发生的伴随因素,冲蚀天坑形成的过程与阶段不像塌陷天坑那样分明有序,而是由地表溪流式落水洞开始,渐进地扩大、增容而成。可以把底部流入含水层洞穴是否演进为地下河水道和坑体规模是否入围天坑的下限值,作为划分落水洞或竖井和冲蚀型天坑的两项门限指标。

根据可溶性岩层与非可溶性岩层间的接触与分布关系,可将冲蚀天坑分为两个类,即岩层水平分布式和岩层倾斜接触式。

(1) 岩层水平分布式冲蚀天坑——箐口型

2001年3月25日,我们偶然而又幸运地在重庆市武隆县的后坪乡发现了一个岩层水平分布式箐口型冲蚀天坑群发育区,从而为我国喀斯特天坑成因的二元化提供了实例。那里还是一个可以展示冲蚀天坑形成于上述不同发育阶段的示范地点(图4)。

后坪乡西部的二王屯、白岩脚、河坝、新屋咀一带,地表有大面积的总厚度在2000m以上的砂页岩非可溶性岩层(奥陶系下统大湾组至志留系)分布出露,并在地形上形成一个百余平方公里的盆地。其下垫层为总厚度愈千米的奥陶系下统红花园组至寒武系的碳酸盐岩层,岩层产状平缓,盆地边缘地形标高多在1400m以上,最高为1713m,盆底标高为900~1100m,并有下垫可溶性岩层出露,其地下水总排出口是盆地南面木宗河上游的麻湾洞,标高为750m。碳酸盐岩含水层的包气带厚度在200~400m之间。在这一特殊的地质、地貌与水文地质条件下,密如蛛网的地表沟溪,从北、东、西三面向盆地中心汇流,消失于碳酸盐

岩层中,形成了支支溪流均为“盲谷”的罕有地貌现象。其“盲点”规模大者为天坑,有箐口、牛鼻子、打锣幽、天平庙和石王洞等。而每每分布于天坑之上游段而且规模又小者,则为跌(水)入式落水洞,如董家幽、河坝、山王洞及沙坝塘等。而在灰岩含水层中呈地缝式峡谷状切割的阎王沟,则直接以“流入式”洞穴于灶眼孔纳入二王洞系统。现阶段,天坑的发展正受到新生落水洞的“袭夺”与削弱。诸天坑中以箐口天坑形态最为完美,坑口呈椭圆形,东西长250m,南北宽220m,面积40754m²。体态呈桶状,最大和最小深度分别是295.3m和195.3m。其北、东、南三面有三道地表水呈泻瀑状态跌入坑内,坑底接着河道,再流入一条张着巨口的流入式地下河(二王洞系统)。由于冲蚀型天坑的水源属溶蚀性强的外源水,又补给集中,形成的地下水道及洞穴系统往往相当发育,目前已探测起源于箐口天坑和牛鼻子天坑的二王洞和三王洞系统长度超过18km,估计地下洞穴系统的全长在50km以上。我们的首次调查,就是自二王洞口进入,经2km洞穴通道抵达箐口天坑坑底的。

(2) 岩层倾斜接触式冲蚀天坑——伊甸园型

形成此类天坑的地质结构是,可溶性岩层位于非可溶性岩层之上,两者为较大倾角产状或高角度断层接触关系。天坑位于接触带上,发育于可溶性岩层之中,水源来自非可溶岩分布区的外源水。在我国南部诸省区,此类地质条件下的落水洞和流入式洞穴(或地下河)并不鲜见,但还未发现属于天坑的实例。这可能是缺乏足够流量的集中水流和灰岩含水层包气带厚度较小之故。

据Tony Waltham博士的资料^[4,5],马来西亚沙捞越Mulu国家公园内的伊甸园(Garden of Eden)天坑(图5)可能属于此类。该坑深200m,口部直径800~1200m,仅有一半的周长为灰岩陡壁,另一半为排泄相邻页岩区来水的盲谷而敞开,谷地扩大并封闭的末端有落水洞和洞穴,直角交叉通向一条很大的洞穴管道。由于一侧为非可溶性岩石,这类天坑的形态多是不对称的。

冲蚀天坑的鉴别特征可归纳为以下几点:

(1) 冲蚀天坑总是分布在地表溪流的尽头,地形标高相对较低处,或可溶性与非可溶性岩层出露的边界线附近。地面外源水以跌水或瀑布式流入坑内。

(2) 坑口周边地形起伏较小,缺乏三角面式绝崖。

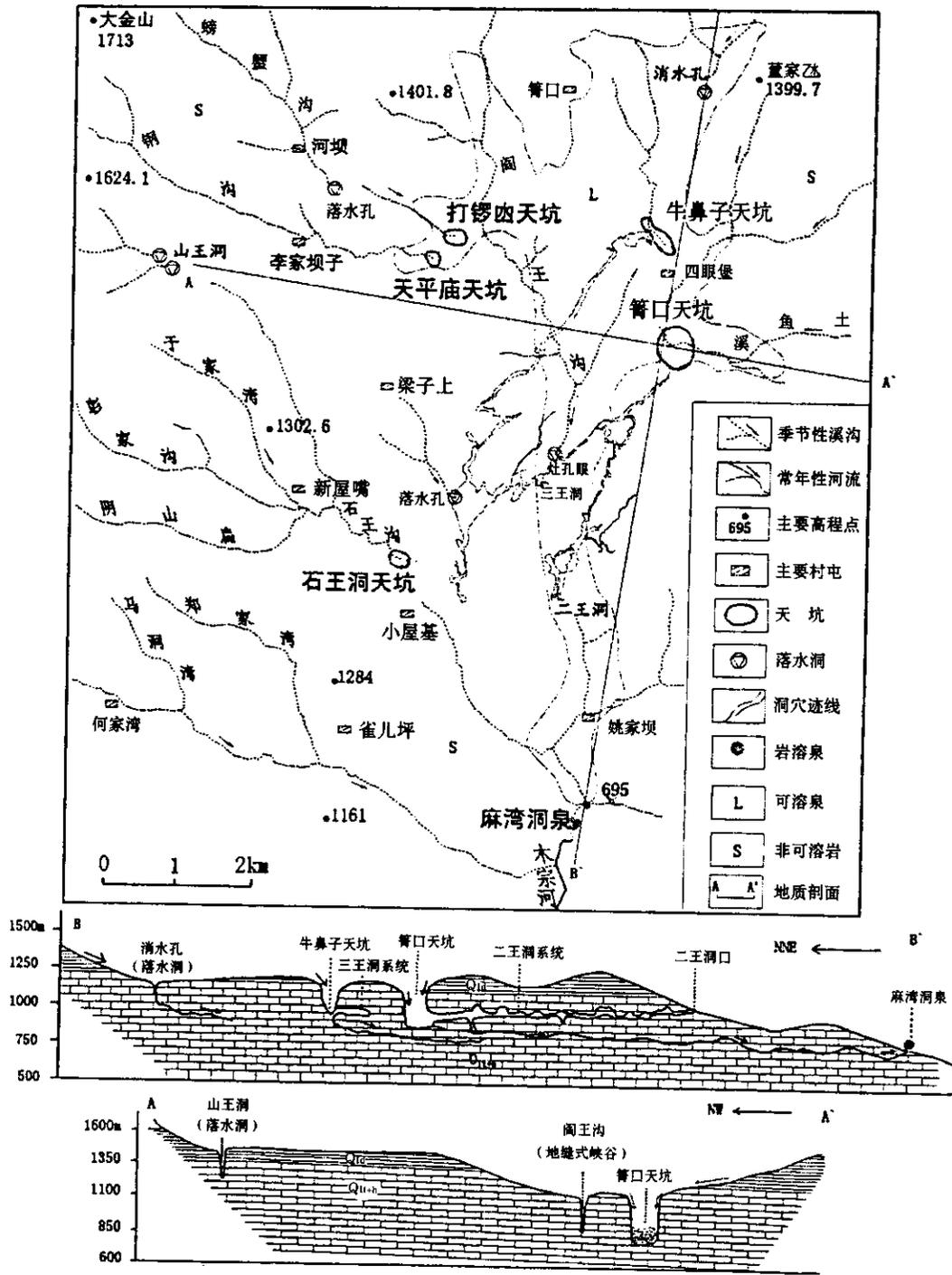


图4 武隆县后坪乡管口天坑(群)喀斯特地质图

Fig.4 Karst Geological map of Qingkou tiangkeng group , Houping Small Town , Wulong County

天坑形体多呈直桶状, $M \geq 1$ (见后文), 周边岩壁直立陡峭, 有水流冲刷痕迹或有瀑布灰华悬挂。坑底沉积物主要为冲积成因。

(3) 坑底地下河为“起源式”而不是“通过式”。一侧有“流入型”, 多为敞开式的洞口或地下河入口。洞穴系统的结构为多层状, 在终端排泄处有“流出型”洞口或大泉, 洞穴输入-输出系统完整, 洞穴化程度

高。

3.2.2 冲蚀天坑形成条件

与塌陷天坑的形成条件比较, 在岩性及其沉积厚度, 含水层包气带性质与厚度及气候与水文地质特性方面, 冲蚀天坑的形成条件与其相近或一致的。岩层的水平至平缓产状, 也是岩层水平分布式冲蚀天坑

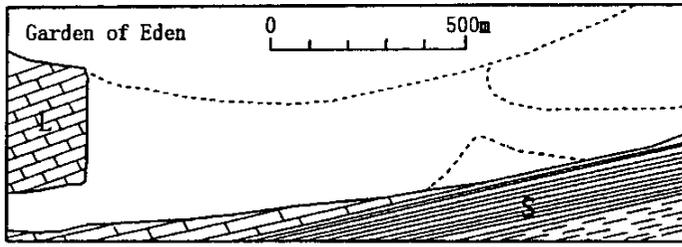


图 5 马来西亚伊甸园天坑示意剖面

Fig.5 Tiangkeng sketch profile of Garden of Eden, Malaysia (from Tony Waltham)

L-石灰岩 S-砂页岩

发育的基本条件。塌陷天坑和冲蚀天坑均有重要的地下河及发达的洞穴系统与之相随,但它们之间的关系却有主从的差别。地下河的存在与发育是塌陷天坑形成绝对必要的条件。但对冲蚀天坑来说,地下河的发育与形成则是其伴生的产物,即地下河的存在是冲蚀天坑形成作用的结果,而不是其发育的前提条件。

概括地说冲蚀天坑形成的主要条件是,沉积厚度较大的非可溶性岩层与可溶性岩层的同时存在;二者间有断然的分布出露或接触关系;可溶性岩含水层有数十至百米以上的包气带厚度;来自非可溶性岩分布

区外源水的水源充足,并集中注入可溶岩含水层中。由此可见,这样的条件及其间的结构关系,在喀斯特区并不是经常可以出现的。这便是冲蚀天坑形成的机会远较塌陷天坑为稀少的原因。

3.3 天坑的发育阶段

不同成因类型的天坑,有不同的发育阶段。

3.3.1 塌陷型天坑

从塌陷天坑的发育条件和形成过程分析可知,塌陷天坑的发育经历三个阶段。即地下河阶段、地下崩塌大厅阶段和天坑出露地表阶段(图6)。

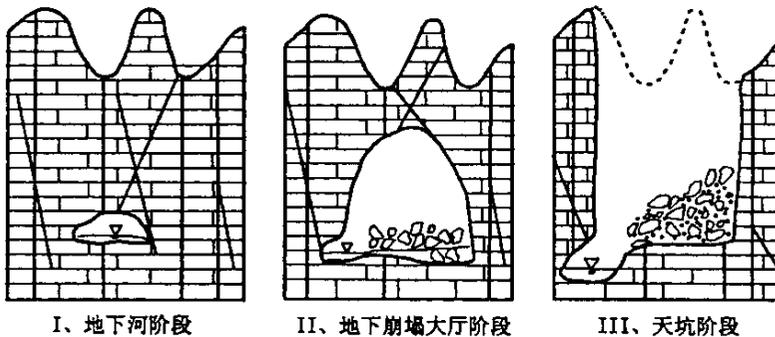


图 6 塌陷天坑发育的三个阶段

Fig.6 Three developing stages of collapsed tiangkeng

地下河阶段:有一条流水终年不竭的地下水道,是天坑形成的首要条件。因为,天坑容积内物质输出的唯一途径只能是通过该地下河道式的水流通道。

地下大厅发育阶段:在地下河道水流强烈的溶蚀、侵蚀作用下,在岩层产状平缓、构造裂隙发育、岩石破碎、或有多层地下河古道重叠交叉的特别有利部位,地下水道顶板发生坍塌,并逐步扩大,最终形成倒置漏斗状或穹窿状的地下大厅。由于岩层中的包气带厚度很大,而岩体的力学剪切、变形、失稳至崩塌,以及崩塌物质之输出,都是一个渐进的过程,所以地

下大厅的形成和发展也应是渐进式的。地下大厅尺寸的大小又基本上决定着可能进一步发展成为天坑的规模。所以地下大厅的形成是天坑发育过程中的一个极其重要的阶段。这一阶段可能出现的范例是在地下大厅穹窿式的顶板上出现地面天窗,如大石围天坑群中“阳光大厅”的冒气洞。

天坑形成阶段:这一阶段的主要发展与表现是,地下大厅穹形顶板的逐步崩塌,并使大厅的腔体露出地表。原属于大厅顶板的部分不断崩塌平行后退,形成周边的悬崖峭壁或崩塌三角面。塌陷天坑形成之

2001至2002年间大规模的中外联合洞穴探险成果表明,大石围天坑群与一个庞大的地下多层洞穴和地下河道系统联系在一起。自大石围天坑向上游的洞穴及地下河道已测绘的长度达60km,并在该地下河系统中发现了两处具世界规模的地下大厅,即:

红玫瑰大厅:与大曹天坑连接,大厅地下河道通达去乐业县城方向的六路坪洞口。大厅呈北东-南西向展布,长300m,宽200余米,净空高200m以上,底面积70,000m²,容积7Mm³。

冒气洞阳光大厅:与白洞天坑连接,其旁侧地下河由六路坪及金银洞两支汇合而成,并向大石围方向流去。大厅为椭圆形,直径180m,净空高260m,底面

积30,000m²,容积5.2Mm³。大厅底部的崩积块石堆高达105m,顶板有直径约15m的冒气洞通达地面。每在冬季,当地面温度低于10℃左右时,上升的地下气流便凝结成白雾从大厅冒出,冒气洞由此得名。

这两个大厅显然由地下河的溶蚀侵蚀引起的塌陷而成,其空间尺寸已达到中型天坑的规模。虽然,在其形成中起主导作用的地下河道已经向旁侧迁移,且大厅之底板已高出现今的地下河道数十至百余米,但由于大厅的跨度很大,仍存在在顶部崩塌出露于地表而成为名符其实的天坑之虞。如果把阳光大厅与白洞天坑联系在一起,则更是天坑发育三阶段的一个生动的模型(图8)。

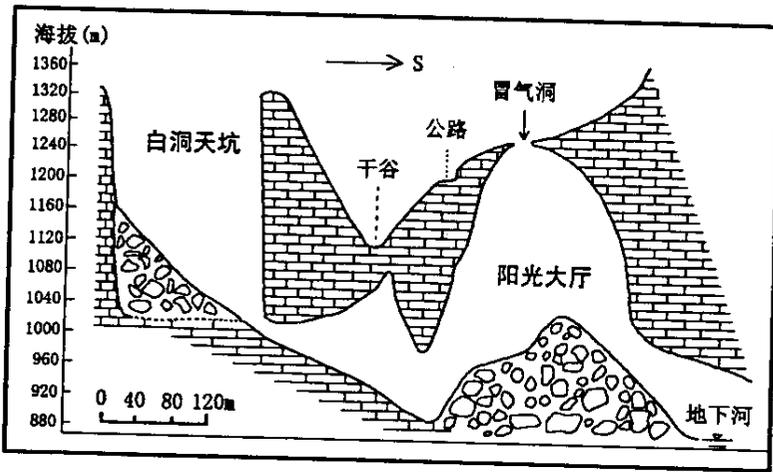


图8 白洞天坑与阳光大厅及地下河生成关系图

Fig. 8 Development relationship among Baidong tiankeng, Yangguang big chamber and subterranean stream

大石围天坑群形态特征的多种多样,反映出它们分别处于不同的发展时期和具有不同的发育成熟度。其中呈倒置漏斗状的如达记($M = 0.63$)、燕子($M = 0.33$)和拉洞($M = 0.83$)天坑等;呈井筒状的如神木、吊井、白洞、苏家、打拢、老屋基、苏家、里郎等($M \approx 1$)天坑;正漏斗状的如大石围($M = 1.77$)、大坨($M = 1.37$)、邓家坨($M = 1.14$)、穿洞($M = 2.4$)、大曹($M = 1.39$)、大洞($M = 1.35$)等天坑。

由此可见,大石围天坑群区的天坑形态以井筒状及正漏斗状为主,可被认为是发育比较成熟的天坑分布区。

3.3.2 冲蚀天坑发育阶段

冲蚀天坑是由地表水以悬垂方式流入可溶岩含水层而形成的,其发育阶段可分为竖井状落水洞阶段和天坑形成阶段。

(1)竖井状落水洞阶段:落水洞由水量相对稳定的地面溪流,流入于包气带厚度较大或很大的可溶岩含水层中,经逐步冲蚀、溶蚀侵蚀而成,为竖井状。与

其它溶蚀成因的竖井状落水洞比较,是其末端有初级的地下管道水流形成,而且发展的速率远较一般落水洞或竖井为高。

(2)天坑形成阶段:如竖井状落水洞获得持续发展的机会,特别是在其流域面积不断扩大的条件下,竖井状落水洞将会发展成为冲蚀型天坑。可以用两方面的指标来鉴别和区分从落水洞进入天坑阶段:一是容积与深度到达天坑的规模;二是与坑底连接的地下水道(含化石洞穴)系统已经形成。

从以上对天坑形成条件和发育阶段的分析可进一步了解到,一般的塌陷漏斗与塌陷天坑之间,一般的竖井与冲蚀天坑之间,在形成条件、发育过程、发育阶段以及形态特征等方面均存在着重要的差别,如果说它们之间存在某些联系的话,也只是个别的、特殊的现象,因为绝大多数的塌陷漏斗和竖井的发展都与天坑的形成无缘。当然,如同自然界许多事物之间的渐进发展、渐进演化和渐进过渡一样,塌陷漏斗和塌陷天坑之间,竖井状落水洞和冲蚀天坑之间也会存在

难以区别的过渡类型。但它们之间的本质区别是,前者的绝大多数不可能发展成为后者。

4 天坑在喀斯特科学研究及旅游资源开发中的意义

4.1 天坑在喀斯特科学研究中的意义

在现代新闻媒体的广泛传播下,我国近年来喀斯特天坑的一系列科学发现,已在广大民众中和旅游界产生了强烈的反响。电视界对这一自然现象的发现,宣传热情更是空前的。4集科普片《中国乐业天坑群》已在2003年元月20日至2月24日CCTV—1陆续播出。国际洞穴与喀斯特同行 Tony Waltham 博士对此也颇为关注。唯国内学术界尚处于寂静之中。当然,就现阶段来说,天坑这一现象尚处于发现和初步研究之中,我们的认识也是十分肤浅的。但是,凡事总得有个开端。下面就简要分析一下天坑在喀斯特科学研究中意义的几个方面:

首先,天坑的形成,表明当地的水文流域内存在一个作用力强大的喀斯特动力系统,亦即物质与能量的输入—输出系统,其主要作用渠道为地下河道及其历史上的化石洞穴。同一流域内天坑群的存在,又为研究地下河道系统的变迁及水道位置的具体迁移提供了依据。

初步的研究表明,无论是那一类成因的天坑,都存在一个重要的物质与能量输入—输出系统。其中输入子系统由分散到集中,输出子系统则以集中为特征。输入子系统由分散到集中的主要集中点,就应是天坑形成的最有利部位。

第二,既然塌陷天坑是地下管道水流——地下河活动的产物,那么,塌陷天坑的系统研究,对认识天坑所在地区喀斯特含水层的性质及地下管道水流的行迹变迁便有重大意义。如前所述,塌陷天坑总是发育在地下河河道的行迹上,冲蚀天坑也是地下管道流的发源地。同一喀斯特水文地质系统中,不同规模、不同高程的天坑群,当可被看作是不断变迁的地下河行迹在地表的反映。广西乐业大石围天坑群共有20多个天坑组成,其坑底分布高程自700m至1400m,集中分布在地下河道位置相对较稳定的东西长16km地带,属百郎地下河系统的中游上部地段。洞穴的探测成果说明,该段地下河道是十分发育的,而且屡屡改道,行迹变迁十分频繁,并呈多层结构。现已查明,大石围天坑底部的地下河道水流,在其下游的6km处,又已丢弃主要河道,而跌入一深数十米的裂隙中。按此趋势,随着地下河道上“裂点”(是河床落水洞最

易产生的地点)的不断向上游推移,大石围天坑将远离地下水道,并结束其年轻的发展状态。现阶段的调查还发现,只有在现阶段直接通达地下河道的天坑,坑底标高分布才是规律有序的,如自上游而下游的大曹天坑为940m,白洞天坑为900m,大石围天坑为850m。其余天坑则悉数被崩塌堆积物所填塞,洞穴探险既难以接近,坑底标高的分布规律亦不易查寻。由此看见,天坑与地下河道之间的关系及其变迁与演化过程的研究,可能会导致人们对喀斯特含水层性质及其发展演化过程认识上的飞跃。

第三,天坑的形成及其发育所达到的深度,既是当地地壳最新上升运动的直接证据,又是上升速率的一项实例记录。小寨天坑位于长江三峡南岸,大石围天坑位于云贵高原南缘的红水河右岸,其所在山地海拔在1300—1500m左右,均为最新上升区。两者的深入研究对于长江三峡及红水河地区地壳最新抬升性质及速率鉴定,显然具有重要意义。

第四,可为喀斯特作用的定量研究提供一个重要途径,并推进人们对喀斯特作用强度和作用速率的新认识。

喀斯特强度与速率的定量研究,一直是洞穴与喀斯特学研究领域中的一项薄弱环节。在缺乏喀斯特作用强度与速率“量”的概念前提下,以常规的地质观念分析一个地区几亿年来的喀斯特发育史,讨论喀斯特地貌的演化序列,其结论的真实性与可信程度是可想而知的。上世纪80年代至今,岩溶地质研究所公布的有关成果大致是:在现代气候条件下,桂林地区溶蚀速率的平均值是 $87.88\text{mm/ka}^{[9]}$,外源水对石灰岩溶蚀速率为 1000mm/ka ,对白云岩溶蚀速率为 $100\text{mm/ka}^{[10]}$ 。实验还证明,水的运动从层流至紊流状态以及随着流速的提高,溶蚀速率更呈高倍数增长。以平均速率 80mm/ka 计,设所在地的排水基准面是绝对静止的,则200万年之后,一座高出基面160m的石灰岩山体将消失殆尽。在外源水流入区,设基准面不断超值(溶蚀速率)下降,那么100万年之内,将有1000m厚度的石灰岩层被溶蚀掉。若以我国南方地区碳酸盐岩沉积的最大厚度——10,000m计,则多至1亿年,少则200万年之后就会不见其踪影,况且在一个碳酸盐沉积发达地区,其连续沉积厚度在2000—3000m便是相当可观的了,也只能满足最低溶蚀率条件下2000—3000万年的溶蚀消耗。而在外源水全面作用下,这个时间概念便是200—300万年。

天坑这一喀斯特形态,正好为人们思考喀斯特作用的速率问题提供了一个极其重要的范例。我们在各地所发现的塌陷天坑中,无论其新老,都毫无例外

地切割并破坏所在地的各类地表岩溶形态,如洼地、漏斗、干谷和锥状山丘等。所发现的冲蚀型天坑,也是十分年轻而且正在强烈发展之中。这一事实有力地说明,在现代地貌条件下,天坑正是所有大型喀斯特地貌现象中最年轻的形态。然而这一后来者,却具有千万至一亿立方米以上的巨大容积,其形成的唯一途径只能是高溶蚀率条件下的物质输出。根据天坑所在流域的排水量及其水文化学特征资料,我们曾粗略地估算过,在现代气候条件下,奉节小寨天坑和乐业大石围天坑的形成时间与年代均应在不足10万年之内,而不是几十万年,更不是几百万年。这与我们在现场考察时曾作过的估计有6、7个数量级的差距。

喀斯特作用是“漫长地质过程”的概念,在以往的喀斯特研究中,似乎一直占有优势,例如人们在讨论某一地区的喀斯特发育史及地貌特征时,常常涉及几千万甚至几亿年的地质过程^[1]。笔者认为,这一类的“古喀斯特”,只有在完全封闭的系统中才有可能存在。在自然界的各种发展中,“地质过程”确实是一种缓慢而漫长的过程。和一切事物的不均一属性一样,地质过程也有相当快速而短促的一面。例如,我国黄河三角洲5400km²土地的形成,仅有不足150年的历史^[12]。看来,在研究喀斯特作用过程时,树立这一概念也是十分重要的。

最后,大型天坑的容积空间多是一个生态环境自成系统的小天地,在生物学、生态学和环境学方面都应具有独特的科学价值与实用意义。例如大石围天坑,在地表植被与生态被破坏无遗的情况下,天坑底部的原始生态便是被保存下来的珍贵生物基因库了。

4.2 天坑在旅游资源开发中的意义

喀斯特天坑是一种自然奇观,多具有奇特、险峻、壮观以及生态和环境诸方面具有一系列大自然界相对稀有的属性。高高的峭崖,幽深的坑底,浩大的空间,神秘的地下水流,终年郁郁葱葱的地下绿色宝库,特殊的生态系统,坐井观天的奇特境界,都会开拓人们的视野,引发人们对大自然造化功力的无限遐想,并可获得精神上和感观上的美好享受。也是一个难得的喀斯特与洞穴科学的科普课堂。同时,天坑又常常与奇峰怪石、壮丽的喀斯特地貌,以及众多的洞穴、地下河、地下大厅共存于一体。故天坑多是一种重要的旅游资源,并可达到自然旅游资源中的“世界级”。重庆市奉节县的小寨天坑,已建成风景名胜,于2000年5月正式向游人开放,目前正在申报世界自然遗产的准备工作。三年来,那里的面貌发生了翻天覆地的变化,与往日的荒废寂静、贫困落后、生态环境逐年恶化形成了鲜明的对比。广西乐业大石

围天坑群的旅游资源集众多的天坑群体、坑内郁郁葱葱的原始生态环境、特有的生物种群、多个世界级规模的地下大厅、壮丽的峰丛(洼地)地貌等一系列特殊的类型、品质于一体,在世界喀斯特区域中尚无二例。大石围天坑群的旅游开发已为广西壮族自治区确定为“使广西旅游业迈上一个新台阶”的项目正在建设之中。世世代代处于贫困落后状态的乐业人民,将迎来一个历史性的发展机遇而面向灿烂的未来。笔者认为,在我国的历史和现实条件下,对自然资源的旅游开发,虽然不可避免地会造成一些资源与环境方面的损失和破坏,但只要遵循科学调查论证—科学规划—合理施工的开发程序和严格的资源保护前提下开发的原则,那里的生态与环境就会向着改善和恢复的方向发展。我国一些重要自然资源,包括已列入世界自然遗产名录的自然资源的开发,虽然曾出现过不少问题,但在经受一些挫折与经验教训之后,前景仍然是令人乐观的。

5 结 语

在完成这篇粗浅的论文之际,有两点需要向读者特别交待与说明。

首先,我国一系列重要喀斯特天坑的科学发现,是与我们从1984年以来组织开展的多次中外联合洞穴探险活动密切地联系在一起。否则,我们便很难有机会接触与发现这些天坑,更难以从地表到地下较深入地去观察和研究它们。为此,我们要特别感谢英国著名的洞穴探险活动家、国际洞穴协会第一副主席、欧洲洞穴基金会主席 Andy Eavis 先生,他与我们建立了长期合作关系,是历次中英探险队外方队伍的组织和领导者。他还8次来华亲临现场指挥和参加探险活动。现任英国洞穴研究会主席、任教于诺丁汉特林特大学(Nottingham Trent university)的著名洞穴和喀斯特学家 Tony Waltham 博士,与我们一起参加了1984年四川兴文县小岩湾天坑的探测研究工作,他为我们收集了世界现有“喀斯特大漏斗”的资料,对我们持续开展对天坑的调查与研究,有重要启示意义。我们还要感谢数以百计的来自英国、爱尔兰、美国、澳大利亚、法国、意大利、瑞士等国的洞穴爱好者和探险家在我国测绘了数百公里的洞穴与地下河,这对我们更深刻地认识天坑的形成条件、进行成因分析有很大帮助。还需要指出的是,来自美国、目前仍在大学求学的 Erin Lynch 女士,以其对我国丰富洞穴资源的深爱和她的刚强毅力,已连续在我国工作两年之久。她发现并探测完成我国最深的竖井(重庆武隆气坑洞),

垂深 920m),在乐业天坑群和武隆箐口天坑群两处共测绘洞穴近 50km。可见,对我国喀斯特天坑现有的调查与认识,是中外洞穴工作者相互合作和一个相当大群体共同劳动的成果。

第二,在洞穴学和喀斯特领域中,人们对天坑的关注与研究是最为不足的。把天坑作为喀斯特现象中的一个独立的形态,从我们正式向公众提出的那天起,也不过只有一年的时间,而且,这一术语要被人们普遍地接受还要经受考验与时间。因此,本文正是一个襁褓中的婴儿,其“稚气”是不言而喻的。人们的真知灼见只能从实践中来。回顾一下 1995 年发表的那篇文章^[2],目前笔者许多重要的认识都改变了,如对小岩湾天坑塌陷成因的质疑,认为天坑形成需要相当长的发育和演化时间,“可以把大型漏斗看作是所在地区相对古老的一种喀斯特形态”等等。尽管目前形成的认识可能与客观事实还相去甚远,但在人们实践—认识—再实践—再认识的这一进程中,应是处于前进而不是后退的过程。尽管如此,在洞穴学与喀斯特学研究中,本文力求从开拓创新方面进行探索的特色还是十分明显的。我们期望,本文对我国今后喀斯特天坑的研究会有所裨益。

参考文献

- [1] 朱学稳. 中国的喀斯特天坑及其科学与价值[N]. 科技导报, 2001 (106) 60-63.
- [2] 朱学稳, 张远海. 四川南部大型喀斯特漏斗和地缝式峡谷[J]. 中国岩溶, 1995, 14(增刊): 1-11.
- [3] 朱学稳, 张任, 张远海, 韩道山. 四川兴文石林区的喀斯特与洞穴[J]. 中国岩溶, 1995, 14(增刊): 28-48.
- [4] Tony waltham, Dave Brook and Simon Bottrell. The caves and karst of Xingwen[J]. China Science, BCRA, 1993 20(3).
- [5] Waltham A. C. The giant dolines of Xingwen[J]. Geog. Journ, 1995.
- [6] 朱学稳. 澳大利亚岩溶以及几个有关岩溶问题的思考[J]. 中国岩溶, 1992, 11(4) 346-354.
- [7] 任美镔, 刘振中主编. 岩溶学概论[M]. 商务印书馆, 1983.
- [8] Mladen GARASIC Speleohydrological Research of crveno jezero(Red Lake) near Imotski in Dinaric karst Area(Croatia) proceedings of second croatia Geological congress. 2000 587-5909.
- [9] 朱学稳, 汪训一, 朱德浩, 等. 桂林岩溶地貌与洞穴研究[M]. 地质出版社, 1988 214.
- [10] 刘再华. 方解石溶蚀、沉积速率控制的物理化学机制[J]. 中国岩溶, 2001 20(1) 75.
- [11] 刘金荣, 黄国彬, 黄学灵, 梁跃成. 广西区域热带岩溶地貌不同类型的演化浅议[J]. 中国岩溶, 2001 20(4) 247-252.
- [12] 单兮. 巨龙喷出的神奇土地 黄河三角洲[N]. 中国国家地理, 2003 507.

A BRIEF STUDY ON KARST TIANKENG

ZHU Xue-wen, ZHU De-hao, HUANG Bao-jian, CHEN Wei-hai, ZHANG Yuan-hai, HAN Dao-shan

(Research Center of Karst Scenery and Caves Resources, Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract : It is not recognized by karstological academia until more and more big karst dolines being discovered in Southern China karst area, although Xiaoyanwan doline in Xingwen County, Sichuan Province has been known since 1980's. It offers us a good chance to make a brief study of karst doline, and we are generally aware that the great type of karst doline should be separated from dolines, that is named as karst tiangkeng. It is the primary research achievement in this thesis, including discovery of tiangkeng all over the world, the difference of karst doline and tiangkeng, definition of tiangkeng, formative types of tiangkeng, developing conditions and stages of tiangkeng, and scientific significance of tiangkeng and its value to tourism development.

Key words : Karst tiangkeng ; Formative type ; Developing conditions ; Scientific significance