文章编号:1001－4810(2006)增刊－0025－010

中国以外的世界天坑概览①

Tony WALTHAM
(Nottingham Trent University, UK)

摘 要:就中国以外已发现的26个天坑的特征和成因进行了一般性的描述和讨论。此外,对其它类型的一些特大型塌陷漏斗也与天坑进行了比较。

关键词:天坑;喀斯特;漏斗;世界
中图分类号:P931.5 文献标识码:A

0 前 言

天坑虽然首先从中国喀斯特地貌中专门提出来并加以描述,但在世界各个喀斯特区也可以找到少数类似的特大型塌陷漏斗。对这些已发现的中国以外的世界级地貌类型本文进行了简单描述,并对比中国天坑地貌的情况,根据天坑的定义:四周岩壁接近直立且长、宽、高均大于100m的塌陷漏斗(朱学稳和Waltham,本专集),将这些特大型漏斗定为天坑。

本文是应朱学稳教授之邀,参加"2005天坑考察项目"后而作,也是针对关于中国天坑的文章(朱学稳和陈伟海,本专集)提出一些看法。本文虽提到一些不属于天坑范围的其它特大型漏斗,但并不包括那些深度和宽度均不足100m的塌陷漏斗,即使在中国称这些漏斗为小天坑。

当然,在一些偏远的热带喀斯特山区以及中国和新不列颠森林覆盖的喀斯特区,也许更多天坑有待发现,但从卫星图像上还看不出来,因此还不能妄下断言。

1 已发现的天坑

1.1 新不列颠,Nakanai喀斯特区

就巴布亚新几内亚的新不列颠Nakanai喀斯特区的大型地下河和许多天坑的发育情况来看,可以说,它是世界上可与中国喀斯特相媲美的地区(Maire, 1981; Audra等, 2001)。但与中国陡峭的峰丛喀斯特不同,Nakanai多边形喀斯特区发育的是喀斯特峰丘,丘峰较和缓,相对高约100m,并可见黏土覆盖的遗迹。然而整个喀斯特区域却发育有8条深峡谷和至少8个大型漏斗,地形起伏不平(见表1)。

Minyé天坑是个大型塌陷漏斗,也是世界上最完美的大天坑之一(图1),它趋近圆形,周围岩壁险峻并完全为树木覆盖,但仅有部分岩壁是直立的(图2)。过境地下河横穿Minyé天坑底部,虽然地下河洞穴既不长也不大,但其流量达25 m^3/s。

Naré天坑较小(图2),但天坑四周直立的和反倾斜的岩壁使它显得非常壮观(图3);Naré天坑与地下河洞穴直接相连,天坑两侧均发育高宽达50m的洞口,地下河流量达15 m^3/s。

Bikbik Vuvu天坑的直立岩壁从上到基岩坑底几乎全为植被掩藏。天坑下游是峡谷状洞穴,宽15m,高达40m;天坑上游是从地表一地缝式峡谷中倾泻而下的河水。Poipun天坑退化较严重,受崩塌块石堆积的阻碍,无法进入地下洞穴。Kea 2天坑周壁直立,但坑底部分为冲积层覆盖。

除此之外,Nakanai喀斯特区还有许多塌陷漏斗,但规模较小,有些可视为小天坑,但却不能与定义上的天坑相比。

---

① 作者简介:Tony WALTHAM,男,教授,英国诺丁汉特林特大学民用工程系。
收稿日期:2006－03－10
万方数据

表 1 国外已知天坑数据及其特征对比

Tab. 1 Dimensions of known tiankengs outside China and some comparable features.

天坑名称	坑口长/坑口 宽(m)	面积(m^2)	深度(m)		体积	级别	类型
			最大	最小	(Mm^3)		
Nakanai, New Britain 新不列颠							
Minyé	350/350	75 000	510	400	26.0	L	
Naré	150/120	13 000	310	240	4.7		
Poipun	150/150	17 000	160	110	1.7		
Bikbik Vuvu	190 / 120	15 000	225	190	1.5		
Kea 2	130 / 110	11 000	125	100	1.2		
Lusé	800 / 600	350 000	250	224	61.0	L	D
Kavakuna	380 / 300	80 000	480	360	12.0	L	D
Wunung	500 / 400	160 000	160	150	24.0	L	D
Ora	900 / 550	240 000	275	270	26.0	L	D
S E Asia Islands 东南亚群岛							
Kukumbu (New Britain)	1000 / 700	380 000	300	280	75.0	L	
Yogoluk (West Papua)	180 / 180	25 000	240	230	4.0		
Sendirian (Sarawak)	115 / 90	12 000	240	180	2.0		I
RMAF Hole (Sarawak)	150 / 120	13 000	110	80	1.3		
Himbiraga (Papua New Guinea)	400 / 200	72 000	>100	100	~5.0		
Slovenia 斯洛文尼亚							
Velika Dolina	300 / 170	30 000	165	120	3.5		
Mala Dolina	170 / 120	14 000	130	95	1.0		
Lisičina	400 / 200	60 000	115	80	2.0		D
Croatia 克罗地亚							
Crveno Jezero	450 / 400	140 000	528	431	30.0	L	
Modro Jezero	700 / 400	190 000	290	160	22.0		D
Mexico 墨西哥							
El Sotano	440 / 210	70 000	455	310	16.0	L	
Golondrinas	300 / 130	26 000	400	355	5.0		I
Brazil 巴西							
Peruaçu North	450 / 200	85 000	170	130	10.0		
Peruaçu South	400 / 180	55 000	150	70	5.0		D
Puerto Rico 波多黎各							
Tres Pueblos Sink	190 / 180	25 000	120	90	2.5		
Madagascar 马达加斯加							
Mangily	700 / 500	280 000	140	100	25.0		
Styx 2	400 / 300	88 000	140	100	8.0		
Other sites 其它地方							
Pozzatina (意大利)	675 / 440	240 000	130	104	14.0		
Pulicchio (意大利)	710 / 550	280 000	100	90	15.0		
Garden of Eden (马来西亚)	1200 / 800	750 000	300	150	150.0		
Sarawak Chamber (马来西亚)	700 / 300	165 000	200	90	15.0		
Lago Azul (巴西)	200 / 140	18 000	280	265	4.3		
Zacaton (墨西哥)	115 / 100	8 000	350	330	2.8		
Sarisarinama (委内瑞拉)	340 / 300	80 000	315	295	21.0		

注:表中引用数据基本可靠,除个别深度为估计外,大部分数据或来自以前出版物或测量所得,当然所有数据都只是接近而已。天坑剖面没有详细绘制。L=**大型天坑**;D=**退化天坑**;I=**不成熟天坑**。

The quoted data are the best available estimates, either previously published or measured off surveys; except for the depths at some sites, all figures are only approximations, as the wall profiles have not been mapped in detail. L = large; D = degraded; I = immature.

万方数据

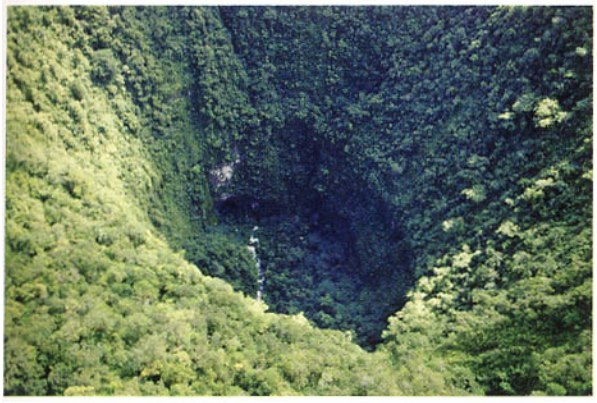

图 1　新不列颠 Nakanai 喀斯特区 Minyé 天坑俯视
（Jean-Paul Sounier 摄）

Fig. 1　Looking down into the Minyé tiankeng, in the Nakanai karst in New Britain. (Photo: Jean-Paul Sounier).

Minyé 天坑和 Naré 天坑是典型、活动和成熟的天坑类型，而Bikbik Vuvu 天坑和Poipun 天坑是规模欠缺的天坑类型。Nakanai 喀斯特区的天坑与中国的天坑相比，显示出它们都是属于受侵蚀少的地形，而且均发育于包气带深厚的、非常活跃的喀斯特区。但是，在它们的演化过程中，相对于崩塌来说，却显示较强的溶蚀能力。Bikbik Vuvu 天坑上游有条地表河倾泄而下，就这一点来说，它可能属于冲蚀型天坑。

Lusé 天坑是三个退化天坑中最大的一个，其体积达 61M m^3，宽度达 600m，底部为崩塌块石和茂密的植被所掩盖，不见地下河的踪迹，而且天坑四周几乎不见完整的崖壁（Maire，1981）。Wunung 天坑相对较小（见表1），但其四周却保存有部分陡峭的岩壁。Kavakuna 天坑只在一面发育有陡直的岩壁，但陡直

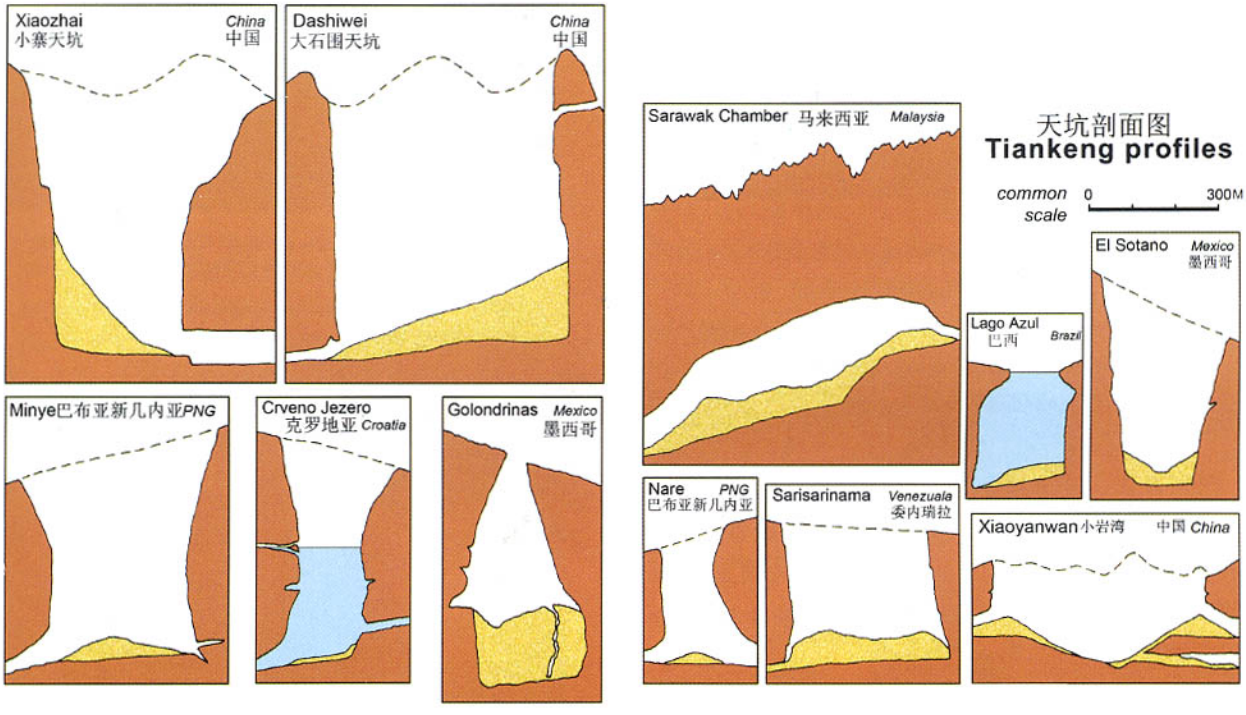

图 2　一些天坑和大漏斗剖面图；块石堆积下面界限为推测

Fig. 2　Profiles of some tiankengs and giant dolines; rock profiles beneath debris are conjectured.

岩壁对面却是一个从口部直达坑底的巨大崩塌块石大斜坡，而洞穴通道位于下端。虽然这三个天坑明显退化，但从其剖面来看却与中国退化的天坑差不多。Ora 是位居第四的退化漏斗，明显发育于地下河洞道上，它曾经是一大型天坑，但现在四周岩壁严重斜坡化，并向外扩展，介于天坑和超级漏斗之间。因此具有双向特征，中间为天生桥（Audra 等，2001）。

1.2　东南亚群岛喀斯特区

巴布亚新几内亚大陆 Muller 山脉 Mamo 高原也

万方数据

许是世界上密度最大的大漏斗群发育区（James，本专集）。它们主要是发育于软弱薄层岩盖中的大漏斗，鲜见陡峭的岩壁。在埋藏的石灰岩中也有一些大型溶蚀竖井，其剖面类似天坑但规模不够，而且其发育均与主要地下河洞穴无关。这些漏斗的大部分均是从空中观察到的，所以将来的实地考察工作可能更详细揭示部分天坑可能是退化的冲蚀型天坑。在 Atea 高原附近，Himbiraga 干谷边有一大型漏斗，据调查，其四周岩壁接近直立，估计规模见表 1。

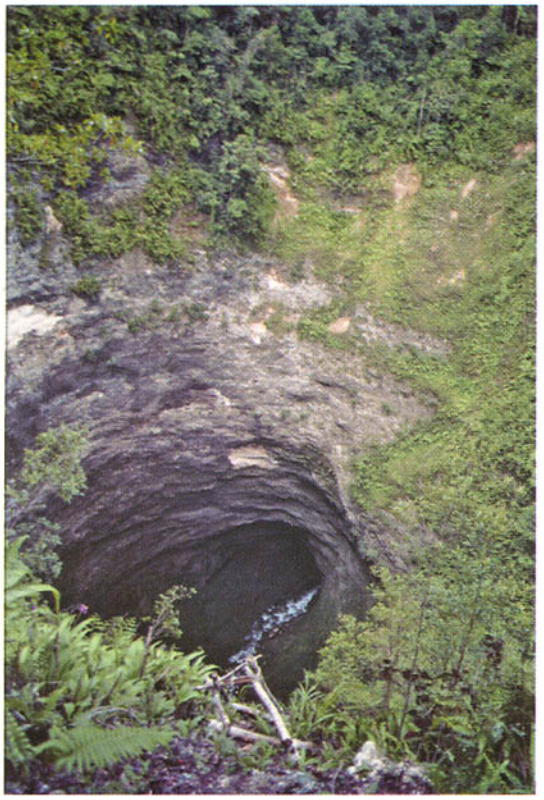

图 3 面向下游地下河洞穴俯视 Nakanai 喀斯特区 Naré 天坑（Jean-Paul Sounier 摄）

Fig. 3 Looking down the Naré tiankeng (Nakanai) towards the downstream river cave. (Photo: Jean-Paul Sounier)

巴布亚新几内亚新不列颠岛 Whiteman 山脉，东与 Nakanai 山脉遥相呼应，其中喀斯特广泛发育，如 Kukumbu 天坑，长达 1km，宏伟壮观，部分遭崩塌退化（表 1），天坑下部与 Arrakis 多层洞道系统相通（Beck，2003）。

在巴布亚中西部（以前称为 Irian Jaya、新几内亚主岛的印尼部分）的 Wamena 喀斯特区，发育有 Yogoluk 天坑，由巨大的化石洞洞顶崩塌而成（图 4），受约 80m 高的崩塌块石堆积的影响，天坑深度无法直观观察（White，1986）。在森林覆盖的高原以南，可从空中看到另外一个大型漏斗，估计可能是天坑（图5）。

迄今为止，在马来西亚的 Borneo 洲 Mulu 喀斯特区，地表地下喀斯特非常发育，但仅发现两个天坑，它们分布在陡峭、森林覆盖山体腹部。其中，Sendirian 洞（又称 Solo）是一个欠成熟天坑，宽度约百米，周壁凹入如钟状（图 6），深度约 200m，底部为块石堆积；RMAF 洞虽没有 Sendirian 洞深，但宽度稍大（表 1），而且四周岩壁陡直或反倾斜（Eavis，本专集，图 4）。两个天坑均为 Clearwater 洞穴系统上层洞道崩塌所形成。

万方数据

图 4 伊朗西部 Wamena 喀斯特区 Yogoluk 天坑（Andy Eavis 摄）

Fig. 4 The tiankeng of Yogoluk in the Wamena karst of West Irian. (Photo: Andy Eavis)

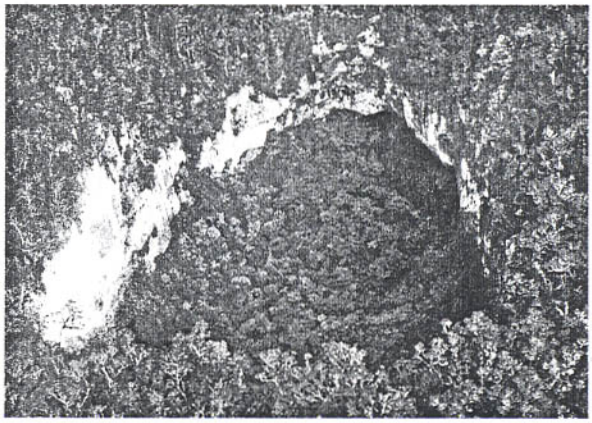

图 5 伊朗西部 Wamena 高原南部喀斯特区未考察的塌陷漏斗（Andy Eavis 摄）

Fig. 5 An unvisited collapse doline on the plateau south of Wamena in West Irian. (Photo: Andy Eavis)

1.3 第纳尔喀斯特区

Imotski 喀斯特区位于克罗地亚南部，紧邻波斯尼亚边境，该区域是第纳尔山脉的中心，发育其中的 Crveno Jezero（Red Lake，红湖）是一个典型的天坑，天坑四周是耸立的红色灰岩崖壁（Kranjc，本专集），天坑宽度达 400m，湖面以上高度达 200m，而湖水深度超过200m，底部是为越流的洪水型洞穴所破坏的

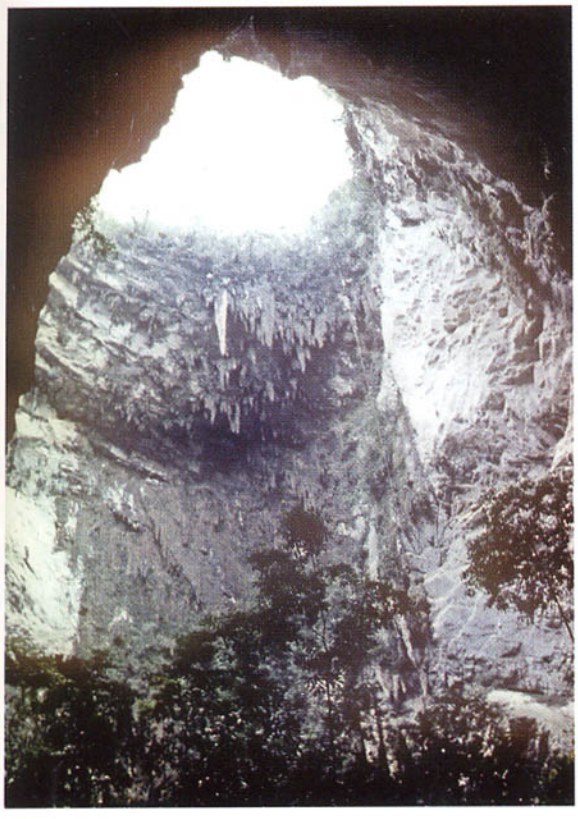

图6　马来西亚沙捞越Mulu喀斯特区Sendirian天坑(Andy Eavis 摄)

Fig. 6　The Sendirian tiankeng in the Mulu karst of Sarawak. (Photo: Andy Eavis)

堆积斜坡。从Crveno Jezero往东不过1km是Modro Jezero(Blue Lake，兰湖)，Modro Jezero是部分退化的天坑，阳光通过敞开的坑口照耀湖面，颜色也发生变化(图7)，湖中的块石堆积的斜坡上的崖壁大部分

图7　克罗地亚Modro Jezero天坑，湖深约80m，底部与Imotsko坡立谷基本水平(图中背景可见)

Fig. 7　The tiankeng of Modro Jezero (Croatia), with its lake about 80 m deep, though it can drain down to a dry floor almost level with the floor of the Imotsko polje (visible in the background).

万方数据

陡直。湖水随季节性降雨量的影响，深度从100m到零米不等。虽然在大小和形态上，Modro Jezero非常相似于现在的Crveno Jezero(表1)，但种种证据表明Modro Jezero在退化之前是个较老的天坑。

Škocjanske洞位于斯洛文尼亚Kras(经典喀斯特)高原边缘，是恰巧从消水洞下游贯穿两大天坑的著名的大型洞穴(图8)。Velika天坑(大漏斗)宽度170m，深度155m，天坑四面大部分崖壁破碎，部分为植被掩盖(表1)。Mala天坑(小漏斗)宽约130m，深度130m，天坑四周有陡直崖壁，也有森林覆盖的斜坡。这两个天坑被地下河洞穴形成的天生桥所分开(Kranjc，本专集，图8)。很显然这两个天坑均是Škocjan洞通道崩塌的结果，Škocjan洞包括高层大型早期洞穴廊道和现代活动的大型地下河洞道(Habic等，1989)。邻近的Lisičina塌陷漏斗是第三位的天坑，但它已经不再活动并且部分退化了，天坑的四周只有部分是陡直的岩壁，它位于灰岩边上不再活动的入水洞的边界线上，现在演化成Sapendol漏斗(图8)，而且其底部位于Škocjan洞的上层早期洞道之上。随着进一步崖壁的后退，这3个天坑可能会合并，到时候，将会形成一个长800m，宽300m的巨型天坑。当然，到那时天坑可能早已退化，而不能再称为天坑了。

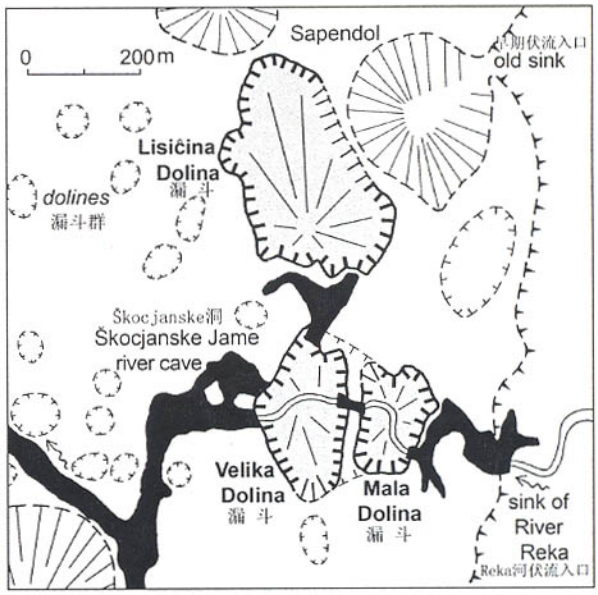

图8　斯洛文尼亚Škocjanske洞和天坑位置图

Fig. 8　Outline map of the cave passages and tiankengs at Škocjanske Jama, Slovenia.

第纳尔喀斯特区为许多特大型漏斗所点缀。Kras高原上的那些漏斗都退化成平缓斜坡，大多数深度不足100m，因此对它们没有必要象天坑一样进

行描述(Kranjc,本专集)更多特大型漏斗也位于Imotski喀斯特区两个天坑周围和Imotsko坡立谷西部末端区域。这包括一些可能早期是天坑或者可能是退化天坑。

1.4 墨西哥喀斯特区

Sierra Madre Oriental(东马德雷)山脉是一个主要的喀斯特山脉,其中发育大量又深又长的洞穴系统和少量的特大型竖井和漏斗(Hose, 2004a)。El Sotano(又称Sotano del Rancho del Barro)是陡峭山麓的一个大裂缝,在水平投影上,它大概有440m长,210m宽,裂缝底部收缩到一半大小(White and White, 本专集,图9)。其斜边高310~455m,基岩为崩塌块石所掩埋(表1,图2)。与之邻近的是Sotano de las Golondrinas,其口部规模虽然仅65m长,50m宽,但因为四周是倒倾斜的岩壁,所以底部尺寸约为130m宽,250m长,深度达400m,而裂隙从底部延伸可达512m,说明块石堆积是大规模崩塌所致。

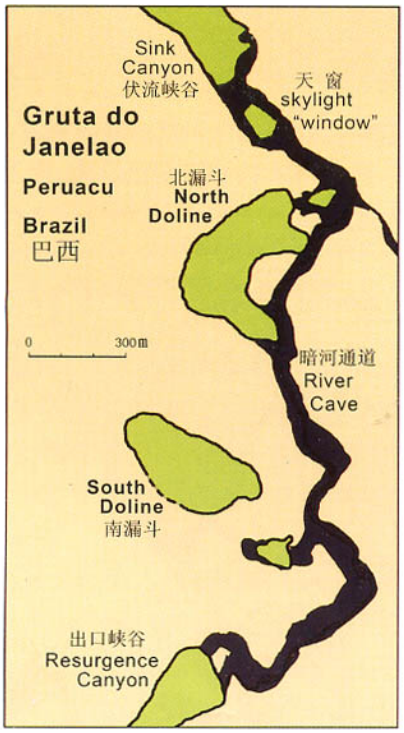

图9 巴西Gruta do Janelãoo边上的天坑分布图

Fig. 9 Outline map of the tiankengs beside the Gruta do Janelão, Brazil.

这两个大竖井都具有一些天坑的特征,El Sotano向下呈锥状发育,并非是典型的顶部塌陷的结果;Golondrinas是不成熟的竖井,但可能四周岩壁崩塌会导致竖井口径达到天坑的水平。这两个竖井即没有任何已知的洞穴进出口,也没有任何已知的地下河洞穴,以及属于什么流域系统,它们过去可能是某条主要河流的消水点,尔后被长期的演化所改变,但是也不排除早期热液扩大的可能性。

在Sierra Madre喀斯特山脉还有其它特大型竖井和漏斗,如Sotano de la Cuesta,上有两个小天窗,高出洞厅底部170m,洞厅长320m,宽90m;Hoya de las Guaguas,是个大型的竖井,下面是一个大型厅堂;El Sotano附近的Culebra也是一个300m深的宽竖井,顶部开口很小。进一步的岩石塌陷可能会导致这3个竖井成为天坑。

1.5 巴西喀斯特区

Minas Gerais的Peruaçu喀斯特因Gruta do Janelão(窗洞)而闻名,大暗河通道长3km,高和宽均接近100m。与洞穴相连的是两个相当于天坑的大型塌陷漏斗(表1)。北部漏斗是Janelao暗河通道早期古洞道弧形通道崩塌的结果,将近500m长(图9)。它以150m高的悬崖为界,高与高原面平,底部为原始森林覆盖,末端洞道为大天窗所破坏。而且洞道北端的第三个天窗位于高层洞穴通道上。南部漏斗较小,可能是某个大型分支洞道崩塌的结果,岩壁沿南面退化。这两个漏斗看起来像典型的中国式天坑。虽然洞顶崩塌产生了很多与洞穴相通的其它漏斗和天窗,但都没有达到天坑的规模。

1.6 波多黎各喀斯特区

Tres Pueblos落水洞位于波多黎各岛北部石灰岩地带,发育于灰岩地带西部低起伏的锥状喀斯特区,它是一个完美的塌陷天坑(表1),几乎滚圆,坑口直径180m,陡直的崖壁高约100m(White and White, 本专集)。在森林覆盖的崩塌块石斜坡底部,Rio Camuy暗河流过坑底,两端洞口高10m,宽30m。虽然沿着这条地下河,还发育有其它各种的塌陷漏斗,但没有一个比它大(AlGurnee等,1967)。

1.7 马达加斯加喀斯特区

马达加斯加北部Ankarana喀斯特高原以石林(当地称为tsingy)和鳄鱼穴居的大型洞穴而闻名(Peyre, 1982; Middleton, 2004)。高原受长断裂控制的峡谷和大量大型塌陷漏斗(当地称为沉陷的森林)所破坏,因而在约150m高的破碎灰岩悬崖下,即峡谷和漏斗底部都发育了流进—流出的地下河洞穴。大型塌陷漏斗中最大者是Mangily漏斗,宽度超过500m(表1)。另外一个大型塌陷漏斗即沿着Ambatomanjahana洞的River Styx廊道发育的第二个天窗,其宽度超过300m(图10)。这两个漏斗周壁高度都超过了100m,而且很显然都与大型洞穴廊道的大型塌陷有关。虽然它们并非发育在峰丛喀斯特中,但确是天坑无疑。Styx 1和Styx 3两个天窗都是峡谷中节

万方数据

理裂缝扩大的结果。在Styx 东部和Ankarana 喀斯特高原东北也发育了一些其它大型塌陷漏斗；此外，Andrafiabe 洞洞顶崩塌也形成了一个宽达70m 的天窗（漏斗）。

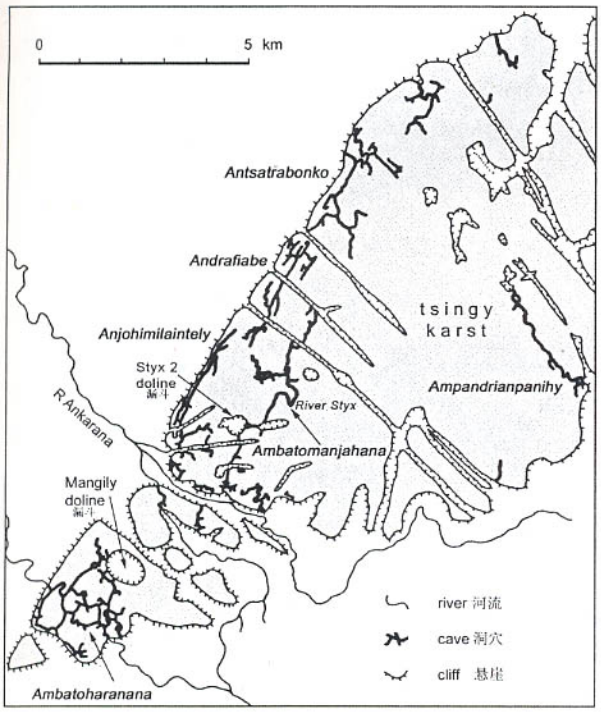

图10 马达加斯加Ankarana 喀斯特区的主要洞穴、峡谷和天坑位置图

Fig. 10 Outline map of the major caves, canyons and tiankengs in the Ankarana karst, Madagascar.

2 特大型塌陷漏斗

2.1 漏斗与天坑的比较

Garden of Eden 是Sarawak 的Mulu 喀斯特区的一个巨型漏斗，受其影响，早期特大型地下主洞道遭到破坏，留下的洞道残迹现在称作Deer 洞 和 Green 洞（图11）。这个巨型漏斗宽度大约有1000m，四周岩壁的一半是高150～300m 陡峭和直立的灰岩绝壁，而受来自雨林的外源水的冲蚀，周壁的其余部分是从底往上的页岩斜坡。因此，这个地方可以认为是个盲谷，碰巧某个大型洞道破坏后形成的盲谷。另外，Garden of Eden 也可以认为是个高度退化的天坑，其体积约150M m^3。Deer 洞宽度和高度均有100m，其洞道与来自页岩斜坡的流入暗河通道相交，交汇处的连续崩塌也许会形成一个特大型漏斗。这种可能是基于附近沙捞越大厅的大规模的崩塌（表1 和图2），也许有一天这一切会发生在Sarawak 大厅身上。

意大利南部的Gargano 喀斯特高原和Murge 喀斯特高原都发育有一些特大型的漏斗（表1）。最大漏斗是Gargano 喀斯特高原的Pozzatina 漏斗（图12），漏斗口径超过500m，深度略超过100m，但却严重退化，只有少部分周壁的斜坡高度从底到顶超过100m。Murge 喀斯特高原有两个特大型的漏斗，漏斗口径均约300m，深一点的是Pulicchio，从水平边缘到底部也就100m 深。四周峭壁从边缘到块石斜坡也就是20～30m 高，然后到宽平的漏斗底部。这种类型的大漏斗（当地称为PULO）可能形成于多次崩塌和小洞穴网状解体，在Pulo di Molfetta 边缘可看到这一点；但是，puli 也可能来源于古喀斯特溶蚀地形（Castiglione and Sauro，2000）。四周峭壁形成可能是上部水平方向的高强度的灰岩掩盖的缘故。没有任何与大型地下河洞道相关的证据，这些puli 也缺乏天坑一样的地形特征，因此最好归为特大型漏斗。

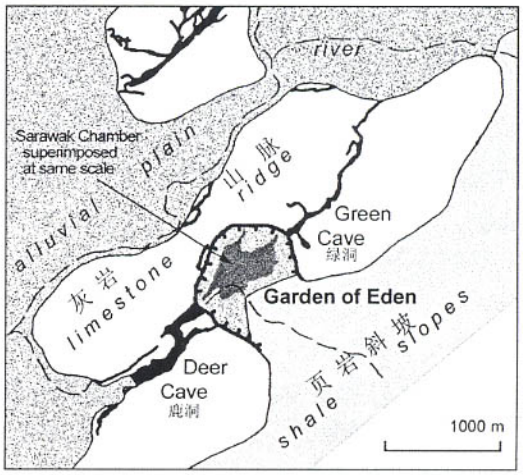

图11 马来西亚Sarawak 的Mulu 喀斯特区Garden of Eden 大漏斗略图，旁边Sarawak 洞穴大厅以同等比例进行比较

Fig. 11 Outline map of the Garden of Eden mega-doline in the Mulu karst, Sarawak, with the outline of the nearby Sarawak Chamber superimposed at the same scale for comparison.

图12 意大利Gargano 喀斯特区Pozzatina 漏斗（John Middleton 摄）

Fig. 12 The Pozzatina doline in the Gargano karst, Italy. (Photo: John Middleton)

万方数据

兰湖，即 Lago Azul，位于巴西巴西利亚西北 200km 的低洼喀斯特区，美丽但不壮观，目前潜水已至斜坡底部，深度达 220～274m（图 2）；反倾斜的岩壁因为偏离潜水线所以没有被详细绘制成图。这个为水淹没的大竖井的规模非常接近Golondrinas 那些漏斗（见表1）。因为缺乏包气带环境和任何已知的地下河洞道，Lago Azul 并非典型的天坑。然而，由于区域性的构造活动，一旦湖水排泄，岩壁不可避免会崩塌改造，这样可能随着包气带水流的侵蚀，其地形会同许多天坑的发育一样发展。与这个淹没竖井相似，在墨西哥也有一个大的 cenote of Zacaton 洞，其直径比 Lago Azul 小，但湖水有 329m 深。除非认为渗流大厅发育与天坑一样，那么 Lago Azul 和 Zacaton 也可以认为都是原始天坑，尽管有些另类。

大石英高原（Great quartzite plateaus）为许多大竖井所分割（Galan and Lagarde，1988），被称为委内瑞拉南部的tepuis。大多数呈现大裂隙，但Sima Mayor de Sarisarinama 在平面上几乎呈圆形，宽度300m，深度 230m（图 2）。它有直立的周壁，崩塌块石底部为雨林掩盖。洞穴沿着石英岩裂隙发育，石英岩化学风化留下来疏松颗粒状堆积，随后被潜蚀作用所机械运移。tepuis 是前寒武纪地层的古构造，即使有崩塌改造，漏斗的发育也是个非常缓慢的过程，但现在其体积却有 18M m^3。假如 Sarisarinama 过去是在石灰岩中而不是在石英岩中，它可能是个壮观的天坑，虽然它缺乏任何大型地下河洞道（现在和过去）。

2.2 其它特大型漏斗

除了那些不符合天坑的所有形态量测和成因特点外（朱学稳和 Waltham，本专集），世界上各个喀斯特区发育的竖井和漏斗可谓形态各异、大小齐全。然而，一些或所有这些竖井和漏斗都可能与天坑的起源相似。竖井和漏斗背后的发育演化机制也可能与关于真正天坑的起源的争论有关。

西亚的阿曼有一些著名的沙漠喀斯特区，如阿曼南部Dhofar 喀斯特区，Tawi Atair 就发育其中。Tawi Atair 是一个塌陷漏斗，深 210m，坑口直径 130m，周壁大部分是直立的岩壁（图 13），其下半部分是个竖井，直径仅有 70m。阿曼北部Selma 喀斯特区，被大型竖井分成两部分，即树枝状洞穴系统和单独的 Majlis al Jinn 洞穴大厅（Hose，2004b）。Majlis al Jinn 洞穴大厅宽度超过 200m，高 120m，洞顶厚度仅 40m，所以这个大厅最终可能会形成天坑大小的深塌陷漏斗。阿曼喀斯特的所有这些特征说明这里过去曾经是更潮湿的气候环境，虽然一些早期热液活动可能对 Majlis al Jinn 大厅的不规则形态起过作用。

万方数据

图 13 阿曼之 Tawi Atair 大漏斗，下部竖井消失于右边视线之外

Fig. 13 The large doline of Tawi Atair, Oman, with the lower shaft dropping out of sight towards the right.

在欧洲阿尔卑斯喀斯特山区，有些很深的竖井，包括位于斯洛文尼亚Kanin massif 的著名Vrtiglavica 竖井，深达 643m。但是这些都是渗流地形，仅有很小的崩塌改造和宽度很少超过 15m。法国的 DeGouffrePadirac 竖井更像天坑，其深度 100m，但竖井直径却不足 50m。

北美没有多少形成天坑的深喀斯特区。如肯德基州 Cedar Sink 是猛犸洞洞道崩塌形成的大漏斗，长 250m，宽 180m，但深度仅有 50m。田纳西州的Grassy Cove 和 Icy Cove（White and White，本专集），发育于较深的喀斯特盆地中，周壁陡峻。这些长数公里的负地形是随着岩壁后退演化而形成的，任何初始洞穴崩塌只是它们发育的小部分，因此，它们都不是天坑。此外，还有一些深竖井和塌陷漏斗，都没有达到天坑标准，至少在长度或者体积上没有达到。

在喀斯特发育的牙买加北部，Linton Park Light Hole，是一个底部被森林覆盖的塌陷漏斗，坑口直径 400m，而且四周是完全垂直的峭壁，高 45～200m。其附近还有Asuno 竖井和Volcano 竖井，两个深度都超过 120m，但宽度仅有 50m。这三个地方都在 Cave River流域内，但都没有达到天坑标准。

在南非有限的喀斯特区域内也有些著名的深淹水竖井。如纳米比亚的Guinas 湖，长145m，宽70m，但它只是一个132m 深的大坑（图14）。南非的Bushmangat 是一个深 264m 的淹水洞厅，在－100m 的水平上，其大小长 240m×宽 75m，但洞口段是个垂直的洞穴，长仅 30m，宽 12m。这些地形都不是天坑，但它们都可以与 Lago Azul 和 Zacaton 进行对比（见上）。

澳洲Nullarbor 喀斯特以其与洞穴通道有关的崩塌大漏斗分布而闻名，虽然洞穴通道宽度可达 40m，但这些塌陷漏斗都没有达到天坑的规模。此外，许多

漏斗被崩塌块石堆积所阻塞,在目前地下水流很小的环境下,这些块石堆积它们不可能被搬运走,因而也不可能形成天坑。离开Nullarbor不远,新南威尔士州的Big Hole,是一个大型岩盖漏斗,漏斗四周的砂岩峭壁非常壮观;其深度115m,但宽度仅有60m。而且Big Hole下面也没有证据显示有大的地下河洞穴,不过附近Wyambene Main Cave的大溶蚀竖井到达了砂岩岩盖的底部。

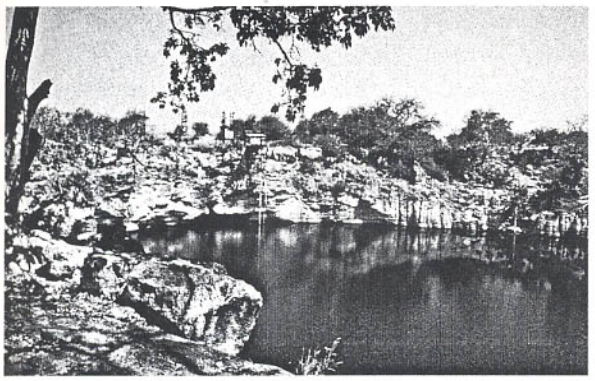

图14 纳米比亚Guinas湖中深坑(远处是抽水站)

Fig. 14 The deep cenote of Lake Guinas, Namibia, with an old water supply pumping station on the far side.

在巴布亚新几内亚Muller山脉的Mamo高原和Atea高原都有许多特大型漏斗,大多数缺乏真正天坑意义上直立的岩壁(James,,本专集)。如位于一个与天坑规模相当的漏斗中的Atea河认可冲蚀型天坑亚型。漏斗西北方向,在Hindenburg高原,还有两个有名的大型塌陷漏斗,Girtoil和Sting,但两个都比一般的天坑小(Brook, 1976)。

2.3 与非灰岩区崩塌地形的比较

对于低机械应力的石膏环境,不可能形成天坑,但也不排除可能有寿命相当短暂的塌陷地形。Kizilcam漏斗位于Sivas附近的土耳其石膏喀斯特区,宽350m,高出湖面50m以上。显然Kizilcam是一个退化的塌陷漏斗(Waltham, 2002),而且四周大部分岩壁破碎,使它不能与中国的哪怕小天坑相比。Vermillion Creek漏斗位于加拿大北部石膏之上超过百米页岩盖层中,是个漂亮的岩盖漏斗(Ford and Williams, 1989),其直立岩壁高出湖面40m。此外,在加拿大Prairie蒸发岩区域,很少见到或者地表没有迹象表明大的塌陷地形,却发现有角砾岩管道,这显然有别于天坑。

就裸露塌陷地形来说,破火山口在规模上可以与灰岩天坑相媲美,其形成是由于岩浆压力下降,火山体失去支撑,坍塌所致。然而,由于岩浆支撑的缓慢下降,内部破火山口底板也是沿着周围断裂整块下降,这相当于喀斯特洞厅支撑被溶蚀掉之后洞顶整块垮塌一样。大多数破火山口都很古老,因此它们也是严重退化,许多现在形成了湖泊,如美国著名的Crater湖和中国的长白山天池。阿拉斯加的Katmai是其中退化最少的破火山口,它是1912年间爆发形成的,宽度近3km,深度达600m,高出湖面300m是陡峭的岩壁(图15)。撒哈拉大沙漠内位于乍得境内Trou au Natron破火山口,虽然更老,但因为很少受侵蚀,所以看上去很新,宽度达6km,大约1000m深,在碎石堆积斜坡之上是趋近直立的岩壁,高度达到500m。

图15 阿拉斯加Katmai火山口(湖右边为冰川)

Fig. 15 The caldera on the Katmai volcano in Alaska, with its internal glacier right of the lake.

3 天坑和崩塌

截至2005年12月,中国已确定了49个天坑(朱学稳和陈伟海,本专集,表1),在世界其它地区也有26个天坑得到确定(表1)。除了中国和第纳尔喀斯特区(石灰岩沉积厚度大)的部分天坑外,这些天坑大部分都分布在热带纬度带内。所有的天坑都发育在成熟的喀斯特区,也有些发育在热带湿润区域。多数已知的天坑都位于的峰丛锥状喀斯特区,虽然很多区域的峰丛没有中国的那样高峻(锥状相对高度)。天坑无疑是发育成熟的一种喀斯特地貌。

除了本文提及的代表性漏斗外,世界喀斯特区还有大量大型塌陷漏斗。许多都是规模巨大、蔚为壮观且极具特色的地貌,但都没有达到所定义的天坑的标准。此外,还有许多大型漏斗成因不太清楚。一般说来这些漏斗多数是大型溶蚀漏斗,但所有的漏斗在它们的演化过程中都发生过岩石崩塌。那些洞穴崩塌作用明显的地方形成的大漏斗可以认为是严重退化的天坑。然而,这未必有多少用处,因为它使得天坑的独特性变得模糊。

因为当时许多石灰石峡谷被草率地认为是"崩塌的洞穴",基于这个无意的结论,崩塌在喀斯特地貌演

万方数据

化中的作用一直没有得到应有的重视，而缓慢溶蚀被认为更加重要。通过对中国天坑的认识以及今后对中国和其它地区特大型漏斗重新研究评价，可能会引发地貌发育思考的一些新思潮。现在，不难下结论地说，大规模的大型洞道崩塌是许多喀斯特区域非常明显的作用。

致　谢：由于多方面的帮助得以收集到这些数据，在此一并感谢。感谢那些无名的探洞者，他们为此绘制了很多地图，特别值得一提的是 Gilberto Menezes 为我们提供了在 Lago Azul 潜水的数据，同时，对作者的许多同事包括 2005 年天坑考察项目内外的同仁在此一并表示谢意。

参考文献

Audra, P, Coninck, P and Sounier, J－P, 2001. Nakanai 1978－1998: 20 Years of Exploration. Association Hemisphere Sud: Antibes, 224pp.

Beck, H, 2003. Beneath the Cloud Forests: a history of cave exploration in Papua New Guinea. Speleo Projects: Switzerland, 352pp.

Brook, D (ed.), 1976. The British New Guinea Speleological Expedition 1975. Trans. Brit. Cave Res. Assoc., 3, 113－243.

Brook, D B and Waltham, A C, 1978. Caves of Mulu. Royal Geographical Society: London, 44 pp.

Castiglione, B and Sauro, U, 2000. Large collapse dolines in Puglia (southern Italy): the cases of "Dolina Pozzatina" in the Gargano plateau and of "puli" in the Murge. Acta Carsologica, 29, 83－93.

Ford, D C and Williams, P F, 1989. Karst Geomorphology and Hydrology. Unwin Hyman: London, 601pp.

Galan, C and Lagarde, J, 1988. Morphologie et evolution des cavernes et formes superficielles dans les quartzites du Roraima (Venezuela). Karstologia, 11, 49－60.

Gurnee, R H., Thrailkill, J V. and Nicholas, B, 1967. Conservation through commercialization-Rio Camuy development proposals. Nat. Speleol. Soc. Bull. 29(2), 27－71.

Habič, P, Knez, M, Kogovsek, J, Kranjc, A, Mihevc, A, Slabe, T, Sebela, S and Zupan, N, 1989. Škocjanske Jame speleological revue. Int. Journ. Speleol., 18, 1－42.

Hose, L D, 2004a. Golondrinas and the giant shafts of Mexico. 390－391, in Gunn, J (ed.), Encyclopedia of Caves and Karst Science, Fitzroy Dearborn: New York.

Hose, L D, 2004b. Selma Plateau caves, Oman. 639－641, in Gunn, J (ed.), Encyclopedia of Caves and Karst Science, Fitzroy Dearborn: New York.

Maire, R, 1981. Giant shafts and underground rivers of the Nakanai Mountains (New Britain). Spelunca, Supplement 2, 8－30.

Middleton, G, 2004. Madagascar. 493－495, in Gunn, J. (ed.), Encyclopedia of Caves and Karst Science, Fitzroy Dearborn: New York.

Peyre, J C, 1982. Expedition speleologique Madagascar 1982. Federation Francais de Speleologie: Paris, 48pp.

Waltham, T, 2002. Gypsum karst near Sivas, Turkey. Cave and Karst Science, 29, 39－44.

White, T (ed.), 1986. The 1985 Indonesia expedition. Cave Science, 13, 25－45.

TIANKENGS OF THE WORLD, OUTSIDE CHINA

Tony WALTHAM

(*Nottingham Trent University, UK*)

Abstract: An inventory of tiankengs that are known outside China is accompanied by brief descriptions and comments on their features and origins. Available data suggests that there are only 26 known tiankengs outside China. Some other very large collapse dolines are compared.

Key words: Tiankeng; Karst; Doline; World

(**原载**《Cave and Karst Science》, 2005, 32(2－3), 67－74. **张远海 译，朱学稳 校**)

万方数据