

重庆奉节天坑地缝喀斯特地质遗迹及发育演化

陈伟海, 朱学稳, 朱德浩, 马祖陆

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘 要: 小寨天坑、天井峡地缝式喀斯特峡谷位于重庆市奉节县南部深切割峰丛谷地区, 发育在一个流域面积 280 km², 落差 1 600 m 的喀斯特水文系统中, 与巨大的地下河相连。前者深 662 m, 口径 626 m, 容积 119×10⁶ m³, 是目前世界上规模最大的天坑; 后者长 6 162 m, 最大深度 229 m, 最小宽度 1 m, 为世界上罕见的地缝式喀斯特峡谷, 具有很高的美学观赏价值和科研价值。天坑、地缝的形成条件, 需要有连续沉积厚度巨大的碳酸盐岩层和平缓的岩层产状、高强度水动力作用地下河的存在、地表深切和地表地下排水基准面的长期大幅度下降、厚度相当大的包气带、地表与地下喀斯特作用协同等。天坑、地缝主要形成于峡谷期(三峡期), 经历了 3 个演化阶段, 即宽缓河流谷地阶段、峡谷及天坑地缝形成阶段和现代河谷持续深切阶段。

关键词: 天坑; 地缝式喀斯特峡谷; 形成条件; 发育演化; 重庆奉节

中图分类号: P931. 5

文献标识码: A

天坑地缝风景区位于重庆市奉节县的南部(图 1), 其核心地质遗迹是小寨天坑和天井峡地缝式喀斯特峡谷(简称天坑、地缝)。前者最大深度 662 m, 最大口径 626 m, 容积 119×10⁶ m³, 在世界同类型天坑中居首位, 有“天下第一坑”的美誉。后者距小寨天坑 3 km, 长 6 162 m, 最大深度 229 m, 最窄处仅 1 m, 亦属世界罕见。

1994 年 8 月, 朱学稳研究员率领中英联合探险队对天坑、地缝和附近的洞穴进行探险和科考, 首次将天坑、地缝作为“世界之最”、“绝世奇观”作科学报道, 确定它们在喀斯特形态学方面的科学地位^[1], 从此引起旅游界、学术界和探险家的浓厚兴趣。2000 年 5 月天坑地缝风景区正式向游人开放; 目前正在申报国家地质公园和世界自然遗产。2001~ 2002 年间, 作者所在的课题组对这一地区进行地质综合考察, 本文为其中的部分成果。

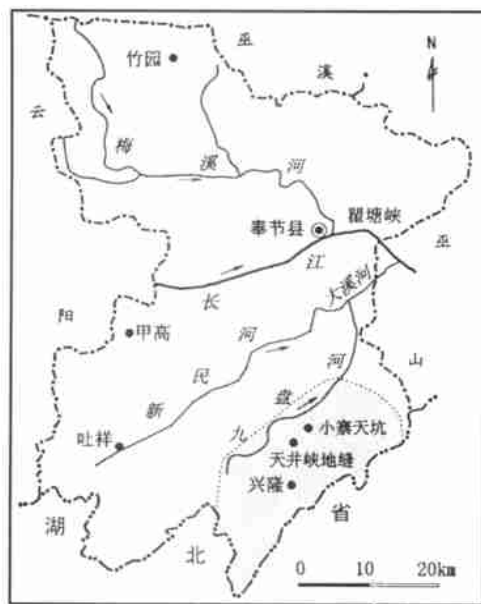


图 1 天坑地缝风景区位置图

Fig. 1 Location of Tiankeng-Difeng tourist site

收稿日期(Received date): 2002- 11- 02; 改回日期(Accepted): 2003- 12- 11。

作者简介(Biography): 陈伟海(1965-), 男(汉族), 广西桂平市人, 副研究员, 1988年毕业于北京大学地质系, 理学士, 主要从事喀斯特景观与洞穴资源调查研究。电话: 0773- 5831300; E-mail: chenweihai@mail.karst.ac.cn [Chen Weihai(1965-), male, Han nationality, Born in Guiping city of Guangxi, Vice research fellow, Graduated from Geology department of Beijing University in 1988, Bachelor of science, Mainly study on karst landscape and caves resource.]

1 地理地质背景

1.1 地形与水系

天坑地缝风景名胜地区地貌上位于四川盆地东部边缘、大巴山前缘和鄂西山地的接壤地带,是长江三峡深切河谷地貌的重要组成部分,以深切割峰丛谷地为其显著特征。地形格局是北部低,北东、南和南西部高。流域地表、地下水分别从北东、南西侧向中南部的兴隆镇一带汇聚,然后往北排往九盘河。九盘河为大溪河(长江南岸一级支流)的支流,流域面积756 km²,地形切割深度1 000 m 以上,河床平均坡降24 ‰,水流湍急,险滩较多。

1.2 地质概况

区域构造上处于川鄂湘黔边缘褶皱带与川东褶皱带的交汇部位,以褶皱为主,断裂较少见,发育有一系列北东走向的背斜和向斜,有齐耀山背斜、巫山向斜、横石溪背斜、官渡向斜和长梁子背斜等。天坑、地缝位于官渡向斜的南东翼,出露的地层有下三叠统嘉陵江组(T_{1j})和大冶组(T_{1d}),岩性为碳酸盐

岩,厚度约1 500 m,地层产状平缓,倾角< 15°。本区东南部还有少量泥盆-石炭系、二叠系不纯灰岩、碎屑岩出露。

1.3 喀斯特水文系统

天坑、地缝所在的喀斯特水文系统大致呈NE60°走向的长方形展布,流域面积280 km²,地形落差1 600 m。系统的组成:上游为地表水流(茅草坝河、硫磺沟、水堰河)和分散地下径流(三板桥、含瑞坝至兴隆镇);中游为地下管道流(兴隆镇-天井峡北端);下游为地下河(天井峡-小寨天坑-迷宫河);兴隆镇-黑眼洞-陈家河所构成的三角形地带为地表、地下径流的转换地带(图2)。地下水最终排入迷宫河,地下河最大、最小流量分别为174 m³/s、1.87 m³/s,多年平均流量8.77 m³/s,属于流量极不稳定的地下河。

2 主要喀斯特地质遗迹

本区最重要的喀斯特地质遗迹为天坑、地缝式喀斯特峡谷和喀斯特洞穴(地下河),见图2。

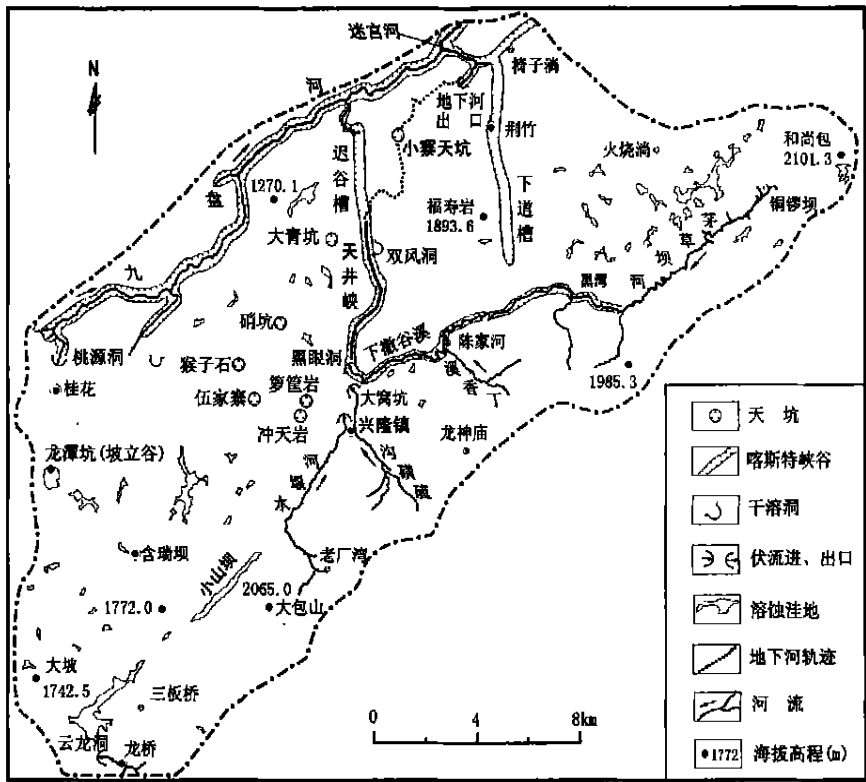


图2 主要喀斯特地质遗迹分布图
Fig. 2 Distribution of main karst geological relics

2.1 天坑

天坑是规模最大的喀斯特地貌形态之一, 曾被称为大型塌陷漏斗^[1]。最近, 朱学稳将这类喀斯特形态命名为天坑^[2], 其含义为: 发育在碳酸盐岩层中, 从地下通向地面, 四周岩壁峭立、深度与口部宽度达数十至数百米以上的陷坑状负地形。天坑的规模分为特、大、中、小 4 个等级, 其深度和口部直径对应为 ≥ 500 m、500~300 m、300~100 m、100~40 m。我国目前发现的重要天坑主要分布在长江和赤水河南岸(右岸), 总数约 50 个^[3]。在这些天坑中, 深度在 500 m 以上, 容积超过 $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的特级天坑, 只有小寨天坑、广西乐业大石围天坑等几个, 在全球也极为稀有。

2.1.1 小寨天坑

小寨天坑位于荆竹乡小寨村, 北距奉节县城 70 km, 地理坐标为 $30^\circ 45' 00'' \text{N}$, $109^\circ 28' 10'' \text{E}$ 。天坑四周均为高峻的几近直立的陡壁所圈闭(图 3), 口部最高和最低点标高分别是 1331 m 和 1180 m, 坑底标高为 669 m, 可见, 它的最大和最小深度为 662 m 和 511 m。小寨天坑在垂向上为双层嵌套结构, 上部坑口呈椭圆形, 直径 537~626 m, 面积 $274 \times 10^3 \text{ m}^2$, 深 320 m; 中部为一个平台(坎); 下部坑口略呈矩形, 长宽为 $357 \text{ m} \times 268 \text{ m}$, 深 342 m, 容积为 $119 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。无论是深度还是容积, 小寨天坑是目前世界上已发现的规模最大的天坑。

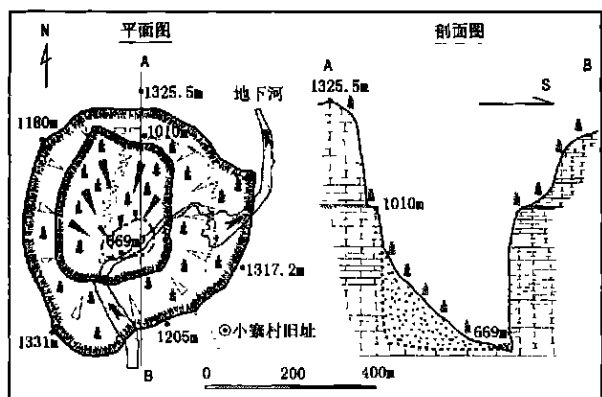


图 3 小寨天坑平面、剖面图

Fig. 3 The plan and profile of Xiaozhai Tiankeng

小寨天坑位于官渡向斜的南东翼, 地层产状平缓。以中部平台为界, 上部为嘉陵江组(T_{1j})中厚层灰岩; 下部为大冶组(T_{1d})泥质灰岩。在东南侧有一条弯弯曲曲的小道通往天坑中部平台; 从平台的北

侧至天坑底部有巨大的锥状崩塌堆积体, 沿其表面斜坡有 2 000 多级蜿蜒的石阶路通往天坑的底部。

2.1.2 其它天坑

除小寨天坑之外, 区内还有硝坑、冲天岩、箩筐岩、伍家寨、猴子石、大青坑等 6 个天坑, 共同构成一个天坑群(见图 2)。这些天坑的深度 < 300 m, 容积 $0.86 \times 10^6 \text{ m}^3 \sim 12.0 \times 10^6 \text{ m}^3$, 都远小于小寨天坑。

2.2 喀斯特峡谷

喀斯特峡谷类型繁多、形态各异, 按地貌结构可分为简单峡谷和复式峡谷; 按形态可分为 V 型峡谷、箱型峡谷和地缝式峡谷等; 按形成时间可分为现代地表河峡谷和干峡谷。地缝式峡谷也是一个在喀斯特学和地貌学中从未使用过的术语, 和天坑一样, 首先出自天坑地缝风景名胜。杨明德教授曾使用过“隙谷”, 表示深度远远大于谷地宽度的特殊类型的峡谷^[4], 国外文献中出现过“Slot canyon”术语, 可能与之类似。

2.2.1 天井峡地缝式喀斯特峡谷

天井峡地缝式喀斯特峡谷位于小寨天坑之南约 3 km。其南部与下撒谷溪峡谷相接, 北部与迟谷槽峡谷相接。由上部较开阔的 U 型峡谷和下部的地缝式喀斯特峡谷组成。峡谷近南北走向, 起点位于地缝南端入口, 终点位于北部的上迟谷槽村之南(图 4), 全长 6 162 m。谷底高程从 1 172 m 降至 854 m。谷底宽 1~15 m, 垂直深 80~229 m。由南往北, 从峡谷底部行走, 但见峡谷弯弯曲曲, 忽宽忽窄, 谷底忽明忽暗, 忽高忽低。狭窄处峡谷宽仅 1~2 m, 地缝末端是整个峡谷中最深的地段, 达 229 m。从峡谷底部仰视, 可见两壁岩石耸立, 若即若离, 阳光犹如一丝丝光柱直射而下, 形成“一线天”景观。

天井峡地缝式峡谷现在是干谷, 早期的地表水是经过其上部开阔峡谷和迟谷槽排往九盘河。后来由于峡谷的下切, 使地表水流从天井峡北端流入地下, 迟谷槽变为干峡谷。而随着地壳的进一步抬升, 天井峡地缝底部又发育了多处落水洞, 特别是天井峡南端的黑眼洞的形成, 使地表水流从黑眼洞往位置更低的地下排水道排泄, 天井峡成为干谷, 只在洪水时谷底才有水流流动。

2.2.2 迟谷槽峡谷

迟谷槽峡谷是天井峡地缝式喀斯特峡谷上部较开阔的喀斯特峡谷向北的延续, 即为这一地区早期的地表河道, 后来由于天井峡的下切, 使水流从天井峡流入地下, 迟谷槽成为干峡谷。峡谷的南部与天

井峡地缝相接,向北经狗脚湾往西拐至九十九道拐附近与九盘河峡谷相接。

2.2.3 迷宫河峡谷

迷宫河是十分典型的断头河,天坑地缝喀斯特水文系统的下游地下河经过小寨天坑流至此处,从陡崖绝壁中流出,成为景色迷人的迷宫河源头。在流水的长期下切和溯源侵蚀作用下形成了两侧绝壁陡峻的迷宫河峡谷,平面形态为往下游逐渐变窄的囊状,谷宽约 300 m,深 600~ 700 m。

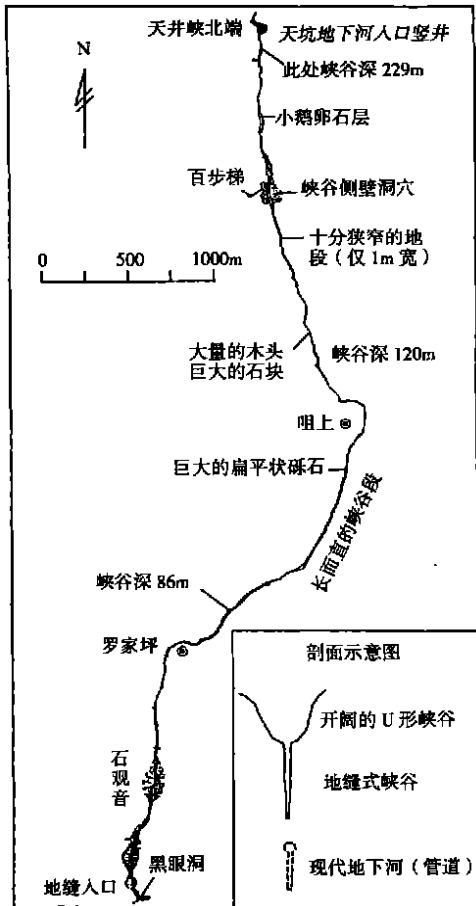


图 4 天井峡地缝式喀斯特峡谷平面图

Fig. 4 Plan map of Tianjingxia fissure karst gorge

2.3 洞穴与地下河

1994~ 2002 年间,岩溶地质研究所先后组织了 6 次中英联合地下河洞穴探险^[1,5]。与天坑、地缝的形成演化直接相关的是天井峡-小寨天坑-迷宫河地下河和黑眼洞。

2.3.1 天井峡-小寨天坑-迷宫河地下河

该地下河(洞穴)始于天井峡地缝的北端,途经小寨天坑,通往迷宫河(图 5),全长 8 500 m。洞穴

通道平直,延伸方向主要受 NW、NNW、NE 向裂隙控制。洞穴规模宏大,洞宽一般 10~ 30 m,洞高最大达 150 m。洞穴横剖面呈倒“V”字形,为典型的峡谷式洞道。洞内次生化学沉积物少见,主要为崩塌岩块堆积。从地下河上游向下游方向纵剖面呈阶梯式降低,并有多处陡坎,形成多处瀑布,最大的瀑布落差达 65 m。从天井峡北端地下河入口至迷宫河出口,洞底高程从 854 m 降低到 490 m,落差 364 m,纵剖面平均坡降为 42.8‰,具有强劲的水动力条件,为小寨天坑崩塌物质的搬运并向纵深发展提供了有利条件。

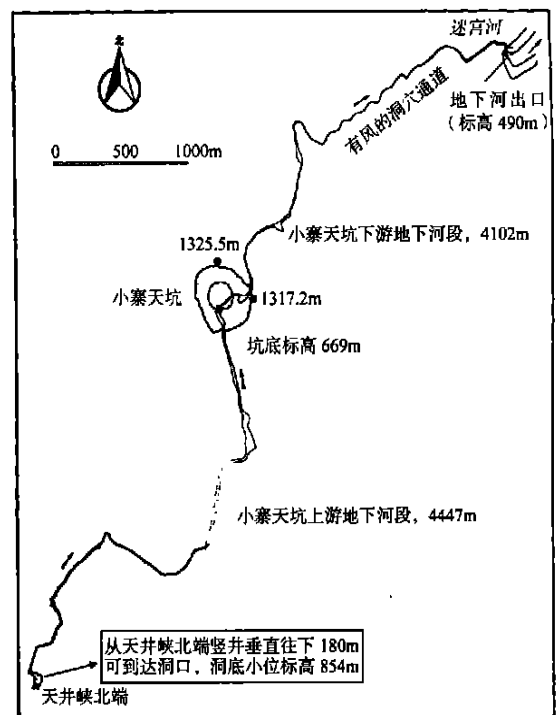


图 5 天井峡-小寨天坑-迷宫河地下河洞穴平面图

Fig. 5 The caves plan around Tianjingxia, Xiaozhai

Tiankeng and Migong underground river

2.3.2 黑眼洞

黑眼洞位于天井峡南端入口附近,地缝底部东侧,为典型的流入型洞穴,本区地表水主要通过黑眼洞及附近的落水洞流入地下。洞穴以竖井式洞道为主(图 6),从洞口向下为一深 26 m 的竖井,竖井下为一倾斜的大厅,大厅内有水流冲刷过的崩塌岩块。从大厅的东北角向前为一较陡的峡谷式斜坡,尽头为一深 54 m 的竖井。从该竖井底部往前为地下河式近水平溶洞,横剖面呈峡谷状,洞壁光滑,洞底有多个深水潭。在水平溶洞末端附近有一个竖井,越

过竖井后可进入高度 $> 20\text{ m}$ 的峡谷式现代地下河洞道, 此处与洞口的垂直深度为 142 m 。

3 天坑地缝的形成演化

3.1 形成条件

3.1.1 小寨天坑的形成条件

1. 连续沉积厚度巨大的碳酸盐岩层: 小寨天坑所在的下三叠统碳酸盐岩厚 $1\ 500\text{ m}$, 连续沉积厚度巨大的碳酸盐岩地层, 既可形成统一的地下含水层, 又可造就厚度巨大的包气带, 同时有利于碳酸盐岩层在地表的广泛分布与出露, 从而又为形成强大的地下水动力系统创造了必要条件。

2. 平缓的地层产状与地质构造条件: 小寨天坑发育在官渡向斜的南东翼, 岩层产状平缓, 容易产生垂直于层理并切割很深的“X”节理, 有利于地表和地下喀斯特作用的相互沟通, 有利于地下河向深部发育, 又易于岩层的脱顶塌落及悬崖峭壁的形成。在小寨天坑周围, NNW、NE 和 NW 走向的三组裂隙占主导地位, 对地下河和天坑的形成有明显的控制作用。

3. 碳酸盐岩层中形成厚度相当大的包气带: 小寨天坑所在的峰丛标高 $1\ 300\sim 1\ 500\text{ m}$, 地下水排泄基准面高程不足 300 m , 地表切割深度 $> 1\ 000\text{ m}$, 包气带厚度 $> 600\text{ m}$, 为大型天坑的发育创造条件。第四纪以来, 本区地壳抬升, 地表河流强烈溯源侵蚀与深切, 导致地下水位不断下降, 是形成这一水文地质特征的基本动力与原因。

4. 高强度水动力作用地下河的存在与发育: 小寨天坑容积达 $119\times 10^6\text{ m}^3$, 要造就这一巨大的空

间, 必须有一个强有力的物质与能量输入与输出动力系统(即地下河系统), 将天坑形成过程中崩落的物质不断输出。小寨天坑底部有天井峡—小寨天坑—迷宫河地下河通过, 最大流量 $174\text{ m}^3/\text{s}$, 洞穴规模宏大, 水位落差大, 为崩塌物质的搬运提供了有利的条件。

5. 气候与水文条件: 湿润多雨的气候条件所提供的丰沛降水量和较强烈的地表水和地下水循环, 是喀斯特作用中物质、能量交换与循环的动力。天坑地缝喀斯特水文系统流域面积 280 km^2 , 多年平均降水量 $1\ 300\text{ mm}$, 天坑底部有现代地下河通过, 为小寨天坑的形成并向纵深发展和扩大创造极为有利的条件。

3.1.2 天井峡地缝的形成条件

天井峡地缝式喀斯特峡谷与小寨天坑有相互联系、相互影响的系统形成条件。其中, 更突出表现在以下两个方面:

1. 地表深切和地表、地下统一排水基准面的长期大幅度下降: 长江三峡是第四纪以来举世闻名的大幅度抬升区, 极易造成地表深切和地表、地下统一排水基准面的长期大幅度下降。当某一局部地区的侵蚀基准面下降时, 该处地表水流的势能加大, 并转化为动能, 从而加大了河流的侵蚀能力, 促进峡谷的形成。天坑—地缝喀斯特水文系统落差达 $1\ 600\text{ m}$, 地表切割深度 $> 1\ 000\text{ m}$, 天井峡地缝式喀斯特峡谷延续长度 $6\ 162\text{ m}$, 峡谷底部落差 318 m , 坡降 51.6‰ 。

2. 地表与地下喀斯特作用的长期协同: 在天井峡地缝式喀斯特峡谷的形成时期, 地表水的侵蚀切割速度与区域排水基准面的下降速度应保持协调与基本一致, 否则河道水流便会在河床中寻机潜入地下, 地表深切作用将因此受到削弱以至终止, 就像天井峡今日面临的状况一样。

3.2 发育阶段

3.2.1 小寨天坑的发育阶段

小寨天坑是由地下河强烈溶蚀、侵蚀导致岩层不断崩塌并达到地表而成, 其发展由地下到地表, 经历了 3 个阶段(图 7)。

1. 地下河阶段: 地下河是天坑容积内物质输出的途径。小寨天坑与巨大的天井峡—小寨天坑—迷宫河地下河系统联系在一起, 显然, 这一地下河在天坑形成之前就已经存在。

2. 地下大厅发育阶段: 在地下河水流强烈的溶

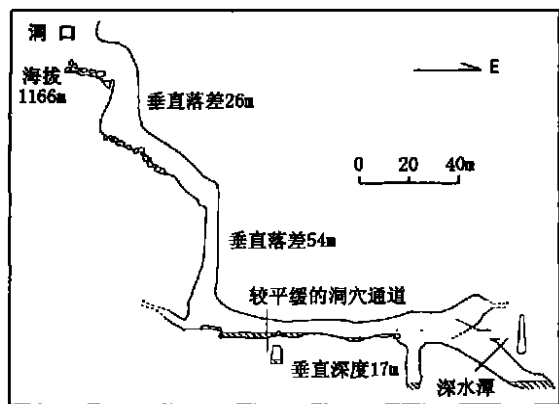


图 6 黑眼洞剖面图

Fig. 6 The profile map of Heyan cave

蚀、侵蚀与物质输出作用下, 在有利部位, 地下河顶板容易发生崩塌, 崩塌物质被地下河不断输出, 空间不断扩大, 最终形成倒置漏斗状或穹窿状的地下大厅。地下大厅的大小基本上决定着可能进一步发展成为天坑的规模。

3. 天坑形成阶段: 地下大厅穹形顶板逐步崩塌并露出地表, 形成天坑。原来属于地下大厅顶板的岩层不断崩塌和平行后退, 最终形成悬崖峭壁或崩塌三角面。

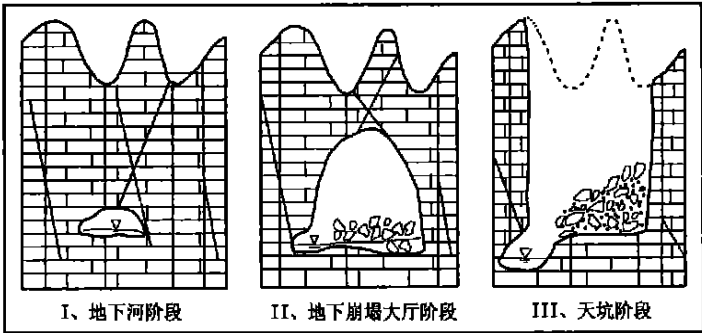


图 7 天坑发育的三个阶段(据文献[3])

Fig. 7 Three stages of karst tiangkeng development

3. 2. 2 天井峡地缝式岩溶峡谷的发育阶段

天井峡地缝式喀斯特峡谷的发育大致经历了宽缓谷地阶段、天井峡持续下切和形成阶段、现代天井峡(地下河)阶段等 3 个发育阶段, 它与天坑、地缝地貌发育演化过程是对应的。

3. 3 天坑、地缝的发育演化过程

小寨天坑及天井峡地缝是天坑-地缝喀斯特水文系统发育演化作用与过程在地表、地下的重要表征, 两者具有相互协同、相互影响的演化过程。从地貌形态特征看, 本区地貌的形成、演化与我国南方普遍发育的 3 个主要地文期(鄂西期、山原期、峡谷期)

相对应(图 8)。而峡谷期(三峡期)是本地区地貌形成的重要时期。天坑、地缝经历了 3 个发育演化阶段:

第一阶段: 宽缓河流谷地阶段。在三峡期(峡谷期)的早期阶段, 大致相当于早更新世至中更新世中期, 本区在山原期末形成的几条锥形河流得以进一步扩大, 形成了茅草坝-陈家河-天井峡-迟谷槽-九盘河地表水系和小寨天坑-迷宫河地下水系及其下游的迷宫河-椅子淌-下溪沟地表河这两大水系。由于这一时期地壳处于相对较为缓慢的抬升阶段, 地表水以侧向侵蚀作用为主, 形成的河谷地貌形

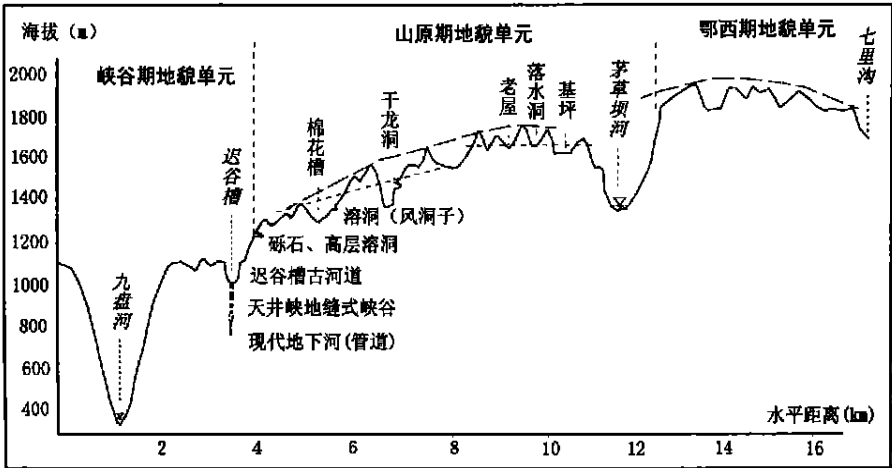


图 8 天坑地缝地区综合地貌剖面图

Fig. 9 The comprehensive landform profile of Tiankeng- Difeng area

态以宽缓谷地为主,保留有现今的天井峡上部 U 形宽谷、迟谷槽干河谷等地貌形态。

第二阶段:峡谷及天坑、地缝形成阶段。更新世中晚期,地壳抬升速度加快,长江三峡河谷下切,区域排水基准面发生大幅度下降。在这一阶段,小寨天坑-迷宫河地下河通过溯源侵蚀作用向天井峡一带延伸,最终袭夺了天井峡-迟谷槽地表河,致使该地表河在天井峡北端汇入小寨天坑地下河中,迟谷槽成为干谷。天井峡-小寨天坑-迷宫河地下河通过对天井峡-迟谷槽地表河及其上游几个支流的袭夺,使整个水文系统的河流纵剖面坡降普遍加大,流量增加,从而增强了水对岩石的侵蚀、溶蚀和搬运能力。正是由于上述地貌、水文、水动力条件的变化,使地表、地下水快速持续下切,并与区域排泄基准面下降速度达到协调,使得天井峡地缝式峡谷得以形成。小寨天坑地下河也不断下切,形成高度 $> 150\text{ m}$ 的峡谷式地下通道,洞穴大厅也不断扩大其规模,最后经过顶部的不断崩塌和侧壁的平行后退,在横向不断扩大,在纵向则向地下和地表发展,最后形成今日所见到的小寨天坑。

第三阶段:现代河谷持续深切阶段。晚更新世以来,由于地壳抬升的速度加快,使作为本区排泄基准面的九盘河下切速度加快,造成区域地下水位下降,天井峡地缝峡谷底部水流的侵蚀和溶蚀下切速度低于区域地下水位的下降速度,地下河通道已经下潜到它的底部 $100\sim 150\text{ m}$ 以下深处,天井峡峡谷被遗弃成为干谷。峡谷底部地表水流入地下河的位置则从天井峡北端的地缝洞入口逐渐后退到地缝南端的黑眼洞。地下河洞穴系统中普遍出现跌水和瀑布,也表明地下河下切和溯源侵蚀作用仍在进行,小寨天坑也在不断加深和扩大规模。

4 天坑地缝在世界同类型地貌景观中的地位

4.1 珍稀奇特程度

通过对比研究^[6~9],按深度、总容积等指标来衡量,小寨天坑为世界上最大的天坑。而且,天坑的四周均为高峻、几近直立的陡壁所圈闭;深度与宽度比达到 $1:1$,形态特征十分典型。天井峡地缝的长度大且连续性好,峡谷极为狭窄,切割深度大,是世界上较为罕见的地缝式喀斯特峡谷,迄今尚未看到在这些方面超过天井峡地缝的报导和有关资料。

4.2 美学观赏价值

天坑、地缝的美学价值主要表现在纯自然的形式美。小寨天坑巨大但近圆形的坑口令人在雄伟中感受到柔和;陡峭高耸的绝壁显示出无比的险峻,但天坑上下部之间的平台又使人在险峻中感到平稳。在大自然形象美的诸多价值特征中,小寨天坑至少具备雄、奇、险、幽、奥等几项,662 m 的巨大深度、200~300 m 高的峭壁悬崖、幽深曲折的盘旋小道、从坑口至坑底变化的环境和植被、 $274\times 10^3\text{ m}^2$ 的巨大坑口和在坑底仰视时只能见到小小一方蓝天所形成的强烈反差、坑底那高达150 m 的峡谷状洞穴和深远黑暗的洞道,更给人无尽的遐想。对天井峡地缝来说,从高处或远处看,位于上部较宽的谷地底部的地缝蜿蜒曲折于石峰之中,给人以轻快流畅、舒缓而又神秘的感觉;而在峡谷底部,峭壁逼仄,形态万千,给人的感受更是多种多样。

4.3 科学研究价值

在以往的科学文献中,类似小寨天坑这样的喀斯特形态,一般被归入“塌陷漏斗”范畴。随着小寨天坑以及广西乐业大石围等天坑的科学发现,天坑这种特殊的喀斯特形态类型已引起喀斯特学界的关注。随着研究的深入,天坑有可能从一个地名而成为国际性的科学术语。

对小寨天坑的研究,既使人们获得许多新的科学发现,又给人们新的启示和挑战。对天坑的研究,将有助于人们对喀斯特作用的基本性质,特别是溶蚀、崩塌、侵蚀作用的机制以及相互关系认识的深化与发展;天坑与地下河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演化过程认识上的飞跃;可以为喀斯特作用的定量研究提供一个重要途径。天坑的内部形成一种特殊生境,在生物学和生态学研究方面也有特殊的价值。

天井峡地缝式喀斯特峡谷仅仅是众多喀斯特谷地类型中的一种,在天坑地缝风景名胜区内,还发育有喀斯特干谷、盲谷、喀斯特嶂谷、断头河等,这几种谷地的形态典型,具有配套的空间分布,与地下洞穴系统共同组成在成因和发育演化上密不可分的喀斯特水文-地貌系统,它们之间既有很好的空间分布规律,又有时间上先后生成、发展的序列可以追寻,是一处条件极好的喀斯特谷地天然博物馆和科学研究基地。

致谢:参与野外考察和资料收集的人员还有岩

溶研究所韩道山、周维新、张远海, 以及奉节县吴忠、赵贵林等同志, 文中还引用了中英联合科考探险队 1994~2002 年在该地区的科考、探险资料, 在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] Zhu Xuewen, Zhang Yuanhai. The World's largest dolines and great crack gorge in southern Sichuan[J]. *Carsologica Sinica*, 1995, **14** (suppl.): 1~11. [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]
- [2] Zhu Xuewen. China's karst tiankeng and its value for science and tourism[J]. *Science & Technology Review*, 2001, **160**(10): 60~63. [朱学稳. 中国的喀斯特天坑及其科学与旅游价值[J]. 科技导报, 2001, **160**(10): 60~63]
- [3] Zhu Xuewen, Zhu Dehao, Huang Baojian, *et al.* A brief study on karst tiankeng[J]. *Carsologica Sinica*, 2003, **22**(1): 51~65. [朱学稳, 朱德浩, 黄保健, 等. 喀斯特天坑略论[J]. 中国岩溶, 2003, **22**(1): 51~65]
- [4] Yang Mingde. Genesis and evolutionary model of karst gorges[A]. In: *Human Activity and Karst Environment* [C]. Beijing: Science & Technology Press of Beijing, 1994. 85~92. [杨明德. 岩溶峡谷成因及其演化模式[A]. 见: 人类活动与岩溶环境[C]. 北京: 北京科学技术出版社, 1994. 85~92]
- [5] Kevin J Senior. The Yangtze Gorges expedition—China caves project 1994[J]. *Cave and Karst Science*, 1995, **22**(2): 53~67.
- [6] Eavis, A. J. (ed). *Caves of Mulu* '80. Roy. Geog. Soc., 1981. 51~53.
- [7] Maire, R(ed). *Papua New Guinea, Spelunca*, Suppl. 3, 1981. 47~49.
- [8] J. N. JENNINGS. *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell, 1985.
- [9] Ford, D. C., Williams, P. W.. *Karst Geomorphology and Hydrology*. London: Unwin Hyman, 1989.

Karst Geological Relics and Development of Xiaozhai Tiankeng and Tianjinxia Fissure Gorge, Fengjie, Chongqing

CHEN Weihai, ZHU Xuewen, ZHU Dehao, MA Zulu

(*Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi, 541004 China*)

Abstract: Xiaozhai Tiankeng and Tianjinxia fissure gorge are located at the southern of Fengjie County, where is on the deep-cut peak-cluster valley area. They developed at a karst hydrological system with a catchments area of 280 km² and 1 600 m fall, and contact with a huge underground stream. Xiaozhai Tiankeng is the biggest tiankeng by dimensions, with 662 m deep, 626 m in diameter, 119×10⁶ m³ in volume. Tianjinxia is a very unusual fissure karst gorge in the world, with 6 162 m continuous long, 229 m at the deepest point, and less than 1 m at the narrowest point. They exhibit excellent aesthetic and scientific value. The main developed conditions of Tiankeng and Difeng are below: continuous massive carbonated rocks, with gently dipping stratum; high intensity and dynamical underground water; incised surface and general drainage base level descending in a big range to produce a huge vadose zone; surface and underground karstification cooperated with unanimous velocity of surface river down cutting and regional drainage base level descending. The Tiankeng and Difeng mainly evolved at the Gorges stage (Three Gorges stage), with three stages, i. e., smooth broad river valley development stage, tiankeng and difeng development stage, continuous dissected stage of modern river valley stage.

Key words: tiankeng; fissure karst gorge; developed conditions; evolved stages; Fengjie County of Chongqing