中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制

康晓波，王　宇，张　华，代旭升，朱广毅

Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan Plateau

KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, DAI Xusheng, and ZHU Guangyi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202061

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析

Analysis on formation mechanism and process of karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province

郭宇, 周心经, 郑小战, 李晶晶　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 54-59

广州市白云区夏茅村岩溶地面塌陷特征及致灾因素和风险分析

Karst collapse characteristics, disaster factors and risk analysis in Xiamao Village, Baiyun District, Guangzhou City

周心经, 郭宇, 郑小战, 李晶晶, 张俊岭, 朱照宇　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 63-71

广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律

Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province

韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 邹杰　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 131-139

湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类

Types of geological structures and mechanism of karst collapses in Baishazhou, Wuhan City of Hubei Province

陈标典, 李喜, 李祖春, 姜超, 贾毅, 李慧娟, 刘鹏瑞　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 43-52

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

成玉祥, 张卜平, 唐亚明　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 86-91

广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷时空分布规律及成因分析

${suggestArticle.titleEn}

江思义, 吴福, 刘庆超, 黄希明, 李海良　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(3): 65-72

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202061
康晓波, 王宇, 张华, 等. 云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 50-58.
KANG Xiaobo, WANG Yu, ZHANG Hua, *et al*. Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan Plateau[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 50-58.

云南高原岩溶塌陷发育特征及成因机制

康晓波[1], 王　宇[2], 张　华[1], 代旭升[1], 朱广毅[1]
（1. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室/云南省地质环境监测院，云南 昆明　650216；2. 云南省地质调查局，云南 昆明　650051）

摘要：云南高原岩溶塌陷总的特征是由岩溶高原特定的地质环境、岩溶发育、水文地质以及水文气象和人类工程活动等因素综合影响和决定的，文中通过对这些因素及其作用机制的分析，深化了对高原岩溶塌陷基本特征和发育规律的认识。云南高原岩溶塌陷区域上分布零星，地段上呈现“点状”特征，主要集中发育于岩溶断陷盆地、岩溶槽谷（洼）地、岩溶台地或古高原面等特定的岩溶地质环境单元。主要原因是高原大部分区域为裸露型基岩山区，江河深切，垂直岩溶带发育，地下水埋藏普遍较深；盆、谷、洼地等人类聚居区，除边缘地带外，松散土覆盖层厚度较大，且黏性土层占比高，土体固结度也较高；岩溶发育不均匀，岩溶洞、管发育，但总体上地下岩溶率并不高，引发岩溶塌陷的洞、管较为孤立分散。

关键词：岩溶塌陷；高原环境；成因机制；岩溶水文地质；云南高原
中图分类号：P642　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8035（2022）05-0050-09

Characteristics and formation mechanism of karst collapse in Yunnan Plateau

KANG Xiaobo[1], WANG Yu[2], ZHANG Hua[1], DAI Xusheng[1], ZHU Guangyi[1]
（1. *Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area*, *MNR*, *Yunnan Institute of Geological Environment Monitoring*, *Kunming*, *Yunnan*　650216, *China*；
2. *Yunnan Geological Survey*, *Kunming*, *Yunnan*　650051, *China*）

Abstract: The general characteristics of karst collapse in Yunnan plateau is comprehensively influenced and determined by the specific geological environment, karst development, hydrogeology, hydrometeorology and human engineering activities. This article analyses these factors and its mechanism, deepen the understanding on the basic characteristics and development law of karst collapse. The karst collapse in Yunnan Plateau is sporadically distributed, showing "point" characteristics, and mainly develops in karst geological environment units such as karst faulted basin, karst trough valley (depression) land, karst platform or ancient plateau surface.The main reason is that most of the plateau is exposed bedrock mountainous area, with deep rivers, vertical karst zones and deep groundwater.In basin, valley, depression and other areas inhabited by human beings, the overburden of loose soil is thicker, the proportion of cohesive soil layer is higher, and the degree of soil consolidation is higher, except for the marginal zone.Karst development is not uniform, karst caves and tubes are developed, but the underground karst

收稿日期：2022-02-28；**修订日期：**2022-07-11　　**投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目：云南省地质灾害综合防治体系建设（2013～2020）（云财资环〔2020〕68 号）；国家重点研发计划项目（喀斯特断陷盆地石漠化演变及综合治理技术与示范，2016YFC0502500）
第一作者：康晓波（1982-），男，四川汉源人，工程硕士，高级工程师，主要从事地质灾害综合防治体系建设和水工环地质调查研究。E-mail: kangxiaobo1121@163.com
通讯作者：王　宇（1960-），男，云南个旧人，博士，教授级高级工程师，主要从事水工环及灾害地质研究。E-mail: ynddywy@163.com

rate is not high in general, and the caves and tubes that cause karst collapse are isolated and scattered.

Keywords: karst collapse；plateau environment；formation mechanism；karst hydrogeology；yunnan plateau

0　引言

岩溶塌陷是最主要的地质灾害类型之一[1－7]，因其隐蔽性和突发性强，通常危险性较大，破坏性很强。岩溶地质学和地质工程学领域历来重视对岩溶塌陷的理论和防治技术研究与实践总结，形成了大量的研究成果[8－12]。然而，既有的这些研究工作和成果，主要是针对具体的岩溶塌陷点或地段开展的特征和机制研究，主要目的是解决工程建设项目治理和防范岩溶塌陷威胁或危害所面临的问题[13－16]。对于岩溶高原宏观尺度的岩溶塌陷形成条件、发育特征及内在成因机制的研究则很少，且多较为肤浅和缺乏系统性。云南高原岩溶分布面积达 11.09×10^4 km^2，占云南省总面积的 28.14%，但在最新完成的云南省 1∶50 000 地质灾害详细调查所查明的 34 408 处地质灾害点中，岩溶塌陷 475 处，仅占滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、地裂缝、地面沉降 6 大类地质灾害点总数的 1.38%，且区域上分布零星，地段上呈现“点状”特征，并主要集中发育于岩溶断陷盆地、岩溶槽谷（洼）地、岩溶台地或古高原面等特定的岩溶地质环境单元[17]。研究清楚这些特征及其成因机制，对于正确认识高原岩溶塌陷灾害风险和危害性，科学合理地制定高原岩溶塌陷防治战略和规划部署是非常必要的[18]。文中从研究云南高原岩溶发育条件和岩溶塌陷的宏观及微观特征出发，系统而深入地剖析高原岩溶塌陷的主控因素和成因机制，以期揭示高原岩溶塌陷的区域性发育规律，正确评价区域性的岩溶塌陷发展趋势及灾害风险，为高原岩溶塌陷的易发性和风险评价提供科学的依据。

1　岩溶地质环境条件

云南省岩溶区主要分布于东经 102°以东、元江以北的滇东岩溶高原区，滇西北横断山中段至南缘的高山中山峡谷盆地区，以及滇西保山至沧源等褶断带中山宽谷盆地区[19]。岩溶高原山区多为基岩裸露、地下水深埋的岩溶石山和峡谷区，仅在岩溶断陷盆地、岩溶槽谷（洼）地、岩溶台地或古高原面等次级地貌单元存在产生岩溶塌陷的松散土覆盖层和岩溶化地层构成的浅表层岩土体双层结构，易于产生岩溶塌陷。

1.1　岩溶断陷盆地

岩溶断陷盆地通常由断裂作用产生下陷并伴随着侵蚀、溶蚀作用形成，展布方向受区域构造控制，大多呈不规则形。盆地底部地形平坦宽阔，坡度小于 5°，为地表水的径流汇集带，地表水系发育，一般分布有湖、塘、湿地等地表水体，水深几米至几百米，如昆明岩溶断陷盆地，见图 1（a）。

盆底覆盖层形成年代主要为更新世及以前，岩性多为冲积、湖积土层，土层固结度高，稳定性强，厚几米至几十米，由盆地边缘向中心逐渐增加，最厚可达几百米甚至上千米。周边基岩以广泛分布碳酸盐岩为主，连片或条带状分布，与非可溶岩交互产出。

受主干断裂导水、碎屑岩阻隔及断裂控制，盆地边缘大泉、暗河发育，部分地下水在盆地底部富集形成富水块段，地下水位埋深在 10 m 左右，局部覆盖层厚度在 30 m 以内，属浅覆盖型岩溶含水层。钻井开采时，水位的波动容易诱发潜蚀、真空吸蚀等作用，形成地下土洞、地面差异沉降及岩溶塌陷。

1.2　岩溶槽谷（洼）地

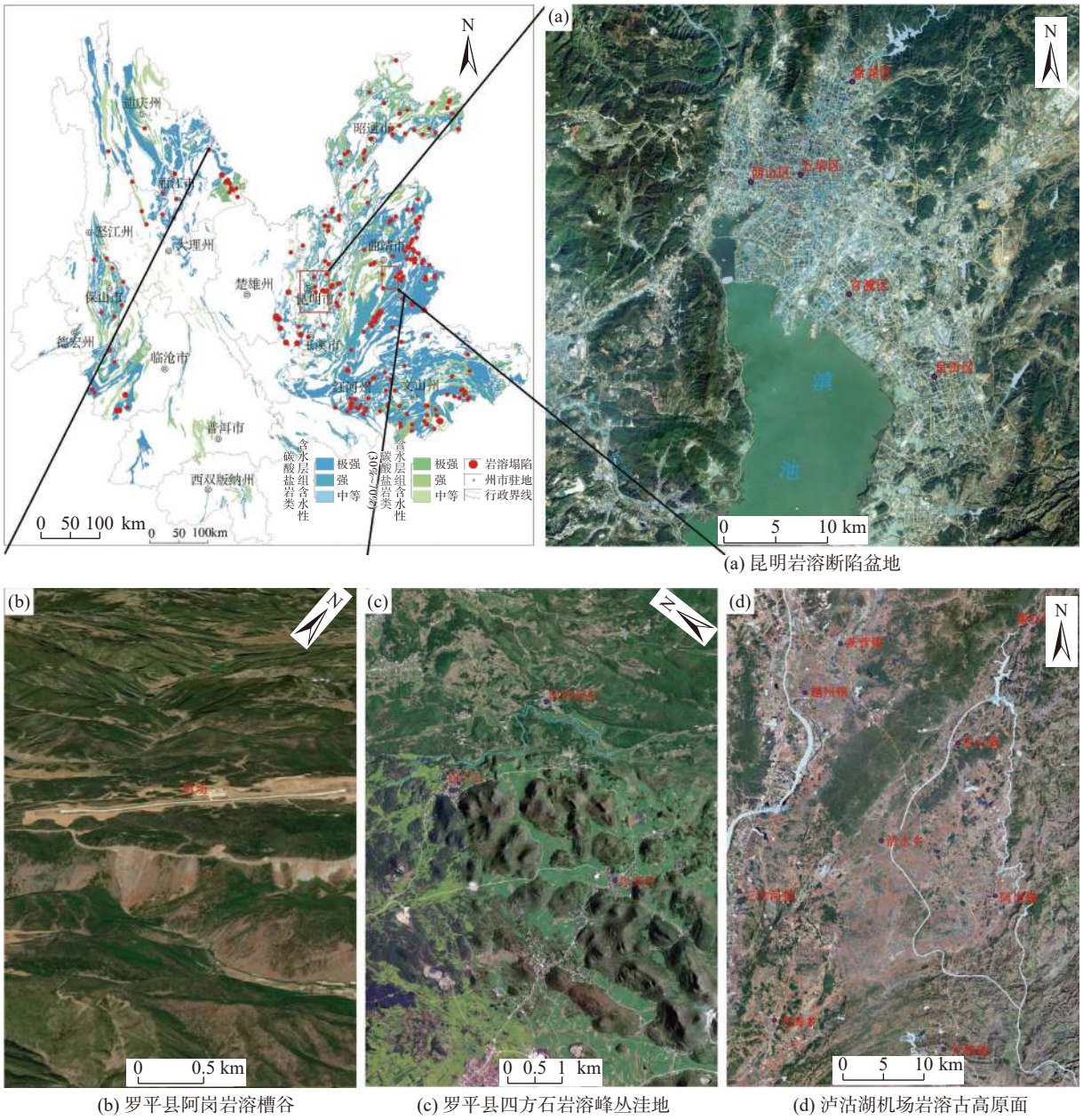
受构造和溶蚀作用控制，岩溶槽谷两侧多由峰丛、孤峰组成正地形，横向上则较为开阔，多呈“U”型谷地。

岩溶槽谷底部的第四系残坡积红土层，厚 2 ~ 30 m，基岩零星出露。岩溶洼地底部常有黏性土松散堆积物覆盖，局部有少量残坡积层，厚度 0 ~ 10 m 不等，岩溶槽谷（洼）地周边碳酸盐岩大多裸露地表。如罗平县阿岗岩溶槽谷，见图 1（b）。

岩溶洼地规模大小不一，平面形态多呈椭圆、圆形、长条形以及不规则形状，长、宽数十米至数千米不等，深 10 ~ 60 m，剖面形态多呈碟状、盆状以及深陷的漏斗状，大多沿构造线及地层走向线呈串珠状排列。如罗平县四方石岩溶峰丛洼地区，见图 1（c）。

岩溶槽谷底部的第四系残坡积红土层，厚 2 ~ 30 m，基岩零星出露。岩溶洼地底部常有黏性土松散堆积物覆盖，局部有少量残坡积层，厚度 0 ~ 10 m 不等。岩溶槽谷（洼）地周边碳酸盐岩大多裸露地表。

岩溶槽谷区易在底部形成饱水带储水构造，峰丛洼地区岩溶发育强烈但不均匀，地表落水洞、天窗分布较多，地下岩溶管道发育，很少形成区域性的地下水富集区。岩溶水位埋深一般小于 30 m。钻井开采地下水引起水位波动较大时，若覆盖层以砂土、粉土类为主，较容易诱发产生岩溶塌陷。



(a) 昆明岩溶断陷盆地

(b) 罗平县阿岗岩溶槽谷 (c) 罗平县四方石岩溶峰丛洼地 (d) 泸沽湖机场岩溶古高原面

图 1 云南岩溶塌陷点分布图

Fig. 1 Distribution map of karst collapse points in Yunnan

1.3 岩溶台地或古高原面

岩溶台地或古高原面为高原大幅隆升与流水强烈下蚀作用的残留地貌形态，分布或出露海拔高，主要分布在 2 000 ~ 3 000 m 的分水岭地带，高原面上总体地形起伏不大，地形坡度 10° ~ 25°，如泸沽湖机场岩溶古高原面，见图 1(d)。

高原面上表层残坡积土层的分布随地形起伏而变化，一般连续分布面积不大，厚度大多小于 10 m。岩溶洼地、落水洞、溶洞管道较发育，为地表水产流区、地下水补给区。

降水从洼地、落水洞灌入式补给地下水，以垂直岩溶管隙和深部陡降的梯级状溶洞管道为径流通道，形成季节性急变管道流，地下水储存量小。岩溶塌陷的形成主要是人为开垦、挖填和线状工程建设、地下工程和矿山开采疏排水导致天然径流状态改变，使得地表水下渗和地下水潜蚀增强所致。

2 岩溶塌陷特征

云南已发生岩溶塌陷事件 1 000 余起，累计造成经济损失超过 5 000 万元[20]，现状有一定规模的岩溶塌

陷共 291 处，主要分布于曲靖、红河、昭通、文山和昆明等地。

2.1　区域分布特征

受碳酸盐岩分布、岩溶发育特征、覆盖层结构特性、水文地质条件等自然因素和地下水开采、矿山开采、地下工程开凿、地表工程扰动等人类工程活动的影响，云南高原岩溶塌陷点的区域分布，总体上呈现零星分散、点状分布的特点（图 1）。

（1）主要发育于岩溶断陷盆地、岩溶槽谷（洼）地、岩溶台地或古高原面等特定的岩溶地质环境单元，盆地中心一般岩溶塌陷发育较少。盆地中心覆盖层一般多以冲积、湖积为主，土体类型以黏性土为主，通常厚度大、塑性好、抗剪强度高，因而产生岩溶塌陷的可能性较低。盆地边缘和山区覆盖层一般多以冲积、洪积、残坡积为主，土体类型以砂土、粉土居多，通常厚度变化大。在覆盖层较薄的地带，若下部岩溶发育程度较高，分布有较大的溶孔、溶洞，容易产生岩溶塌陷。据统计，覆盖层厚度小于 30 m 的浅覆盖岩溶发育区，现状岩溶塌陷占比达 90% 以上。

（2）易发区面积占比小，现状岩溶塌陷零星分散、点状分布，成区、成带趋势不明显。云南省国土面积中，山区约占 94%，平坝仅占 6%[21]。具备岩溶塌陷条件的浅覆盖岩溶平坝区面积约占平坝区的 16%，其中岩溶塌陷易发区面积占比更小。在有限的岩溶塌陷易发区中，地下岩溶发育不均匀，岩溶管道、溶洞等分布较为孤立分散，故形成了现状岩溶塌陷的分布宏观上呈现零星分散、点状分布的特点，未发现成区、成带规律和趋势。

（3）主要分布于滇东岩溶区。滇东岩溶高原岩溶断陷盆地和宽缓槽谷发育，山体残留高原面较多，其中冲湖积成因的松散盖层岩性变化大，结构稳定性差，含透镜状分布的砂质、淤泥质土，覆盖层厚度小于 30 m 的浅覆盖区岩溶发育，往往地下水位在土石分界面附近。在人类活动影响下，易形成岩溶塌陷。滇西岩溶塌陷分布较少，主要因人为影响作用强度较弱。据统计，291 处岩溶塌陷点中，有 245 处位于滇东岩溶区，占 84.19%，有 46 处位于滇西岩溶区，占 15.81%。

2.2　典型岩溶塌陷点剖析

2.2.1　昆明地区岩溶塌陷

昆明城区处于岩溶断陷盆地底部沉积平坝区，是产生岩溶塌陷最多的地区。

（1）地质环境条件

昆明岩溶断陷盆地碳酸盐岩分布面积较广，约占盆地面积的 32%，呈片状出露或是呈条带状与非碳酸盐岩相间分布。新构造运动强烈，褶皱及断裂构造发育，主要有南北向、北东向、北西向、东西向 4 组断裂。新生界松散层主要分布在盆地底部和山间谷地、山前台地，面积约占盆地的 20%。盆地中部覆盖层厚度多大于 50 m，由于间歇性的断陷与抬升交替进行，基底上多为更新统地层，土层固结度高，超固结比 OCR 多大于 1，因此塌陷很少发生。盆地边缘和丘峰谷地区覆盖层厚度小于 30 m 的浅覆盖区主要分布在翠湖、金马寺、马街、海口、大板桥等区域，基底上多为全新统地层覆盖，土层固结度和力学强度较低（表 1）。这些区域下伏基岩岩溶化程度高，以孤立分散的溶隙、溶孔、管道、溶洞为主。地下水位埋深一般小于 20 m，近滇池时仅 1 m 左右。

表 1　昆明盆地浅覆盖区土层基本物理力学指标[22]

Table 1　Basic physical and mechanical indexes of soil layers in shallow coverage area of Kunming Basin

性质	指标	γ/(g·cm^{-3})	W/%	e	I_p	I_L	C/kPa	ψ/(°)	a_{1-2}/kPa^{-1}	Es/kPa	R/kPa
残坡积(Q^{dl+el})	最大平均值	1.96	33.86	0.98	20.54	0.40	69	21.10	0.000 33	12 464	270
	最小平均值	1.83	26.37	0.76	16.04	0.11	42	16.10	0.000 17	7 364	180
	算术平均值	1.89	29.73	0.87	18.08	0.21	56	18.20	0.000 23	9 728	220
冲洪积(Q^{al+pl})	最大平均值	1.95	29.00	0.91	15.29	0.58	50	17.93	0.000 28	9 298	206
	最小平均值	1.89	25.62	0.76	11.00	0.31	37	16.30	0.000 20	6 928	174
	算术平均值	1.92	28.23	0.81	13.00	0.44	47	17.37	0.000 24	8 056	193

（2）基本特征

昆明地区岩溶塌陷主要分布于翠湖—圆通山、马街、金马寺、浑水塘—秧田冲、海口、大板桥和贵昆铁路沿线等地段，此外大普吉、吴家营等地段零星分布。这些岩溶塌陷集中发生于 20 世纪 70—80 年代，进入 2000 年后，塌陷零星、局部发生。据统计，全区已形成塌陷坑 405 个，大多数面积在 100 ~ 1 000 m^2，平面形态以圆状、椭圆状为主，坑口直径 1 ~ 20 m（87% 直径 ≤5 m），剖面形态多为漏斗状、鼓状、桶状和碟状[22－23]（表 2、图 2）。因地下岩溶发育的不均匀性，易形成塌陷的管道、溶洞发育分布离散，控制了岩溶塌陷的分布难以成群、成排发育，总体上呈“点状”分布的特征，很

表 2 昆明地区岩溶塌陷坑分布情况表

Table 2 Distribution of karst collapse pits in Kunming area

塌陷地段	翠湖—圆通山	金马寺	浑水塘—秧田冲	大板桥	马街	庄科山	明朗水库	海口	其他	合计
塌陷坑数/处	116	33	79	24	11	21	76	37	8	405
百分比/%	28.64	8.15	19.51	5.93	2.72	5.19	18.77	9.14	1.98	100

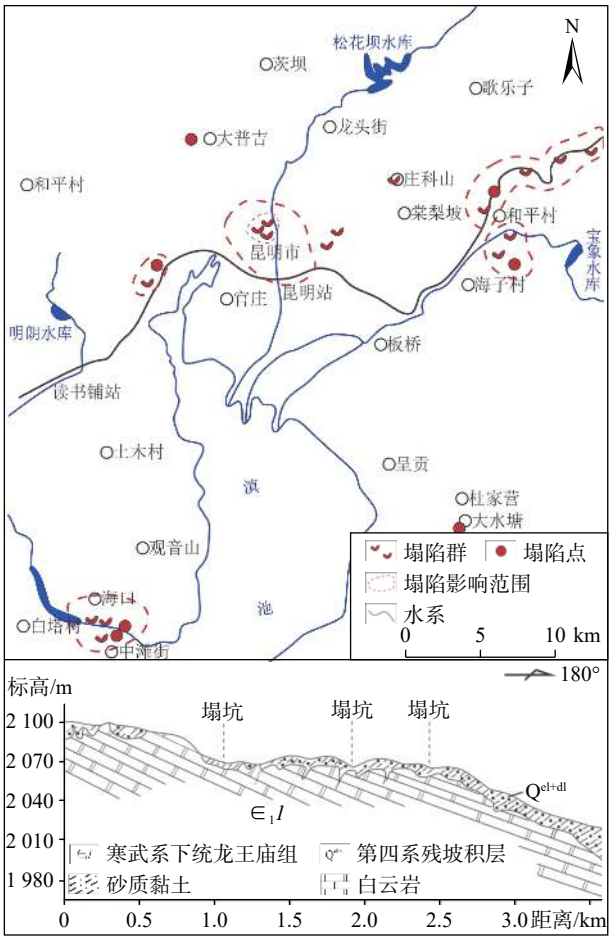


图 2 昆明地区岩溶塌陷分布图及庄科山岩溶塌陷剖面图

Fig. 2 Karst collapse distribution map in Kunming area and Zhuangkeshan karst collapse profile

少有群、成排发育。

(3)成因机制

昆明地区岩溶塌陷基本发生在盆地边缘浅覆盖型岩溶含水层分布区，已发生的岩溶塌陷的形成，多数情况下是多重因素复合叠加作用的结果，诱发因素主要有大气降水、地下水作用和人类工程活动。大气降水在通过覆盖层下渗补给地下水时有利于土洞的形成和发展，最终诱发岩溶塌陷。据统计，岩溶塌陷发生频次最高的时段为 1978—1982 年和 1985—1989 年，这两个时段恰好是丰水年；岩溶塌陷大多发生于 6—9 月，对应降雨集中的时段。工程建设破坏松散层的结构、地下水开采造成的水位下降、地面建筑物加载、建设过程对覆盖层的扰动、工程建设引起的振动等因素，都是已发生岩溶塌陷的主要诱发因素。主要成因机制：一是基坑、防空洞等地下工程强力排水导致松散覆盖层潜蚀形成土洞，甚至产生流沙、流土效应，最终溃决发生地面塌陷；二是地下水集中开采强度过大，造成地下水位快速下降，导致覆盖层潜蚀形成土洞以及水位波动产生的真空吸蚀作用，最后发展为地面塌陷；三是工程建筑截断或改变了天然径流途径导致积水以及各种散乱排水造成下渗增强，导致覆盖土层有效应力降低、侵蚀作用增强、土洞或裂缝发展，在洼地、漏斗和落水洞上形成塌陷。

2.2.2 阿岗槽谷岩溶塌陷

阿岗岩溶槽谷位于云贵高原向广西平原过渡的斜坡地带，行政区划属罗平县，流域面积 1 226.52 km^2。

(1)地质环境条件

阿岗槽谷两侧均为中山，与谷底高差 150 ~ 400 m，地形坡度 20° ~ 25°，山体完整，呈脊状。谷底呈北东—南西向展布，北部狭窄，南部宽缓，长约 63 km，宽 1 ~ 31.5 km，底部面积约 105 km^2，地势相对平坦，坡度在 5°左右。谷底内的微地貌形态发育，表现为洼地、溶丘、孤峰、落水洞、天窗的地貌组合特征，洼地多呈浅碟状，落水洞、天窗多沿暗河管道呈串珠状分布，深度一般 8 ~ 40 m。谷底覆盖层为第四系冲洪积、残坡积层，岩性主要为红土、粉砂质黏土，结构松散，厚度一般小于 6 m，主要分布于谷底洼地内。下伏基岩以泥盆系、石炭系灰岩为主，水平岩溶十分发育，发育较少的溶洞、管道被发育相对均匀的溶隙、溶孔相互贯通，形成树枝状的地下暗河洞管系统。槽谷谷底富水块段内地下水富集而浅埋，但暗河管道流显示急变流的特征，动态变化幅度 15 ~ 30 m。雨季地下管道泄水不及，水流从暗河天窗溢出，使一些落水洞变成冒水洞，低凹地段被淹没。

(2)基本特征

根据最新调查资料，槽谷中现状发育有岩溶塌陷 9 处(图 3)，多为自然条件下由降雨引发的土层塌陷，塌陷坑多呈近圆形或椭圆形，长轴长 0.50 ~ 5 m，平均长 3 m，短轴长 0.3 ~ 3 m，平均长 2 m，塌陷深度 0.7 ~ 6.0 m，平均深 3 m。塌陷坑零星分布于槽谷底部和边缘浅覆

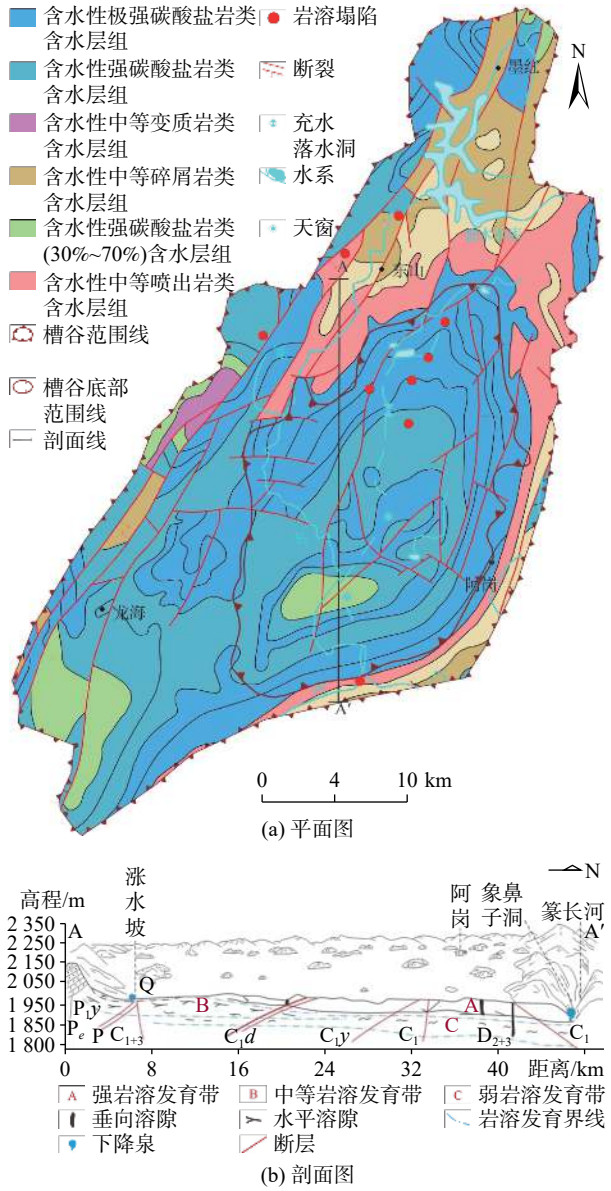


图 3　阿岗槽谷岩溶塌陷分布图及剖面图

Fig. 3　Agang trough karst collapse distribution map and section view

盖区域，未见成群、成片发育规律。

（3）成因机制

阿岗槽谷岩溶塌陷主要分布在北部槽谷底部边缘浅覆盖型岩溶含水层分布区，已发生的岩溶塌陷的形成和发展主要受降雨、地下水位变化诱发和加剧。主要成因机制：降雨和地表水在沿覆盖层的孔隙、裂隙下渗补给地下水过程中，浸润、软化、冲刷、携带走上覆土层松散土体中的细小颗粒，在岩溶管道、溶洞等岩溶发育强度高的土岩接触带形成规模大小不一的土洞，降低了覆盖层的稳定性；地下水位变化时，流向、流速、水力坡度等随之改变，岩溶裂隙、管道、溶洞等中充填物被冲刷的同时，地下水对土岩界面附近的土体掏蚀作用也随之加强，土洞进一步扩大，覆盖层的结构和稳定性被彻底破坏，土洞发展至地表，形成岩溶塌陷。

区内覆盖层主要分布在槽谷底部的洼地中，没有连片发育，厚度变化大，岩性主要为冲洪积、残坡积的红黏土、砂土，结构比较单一，在饱水后稳定性差。下伏基岩为纯度高的碳酸盐岩，水平和垂直岩溶发育程度高，天窗、落水洞、溶洞、管道、溶孔、裂隙等岩溶形态常见，相互间多已贯通，为地下水的快速运移提供了有利空间条件。覆盖层和岩溶管道、溶洞等不均匀分布的特征，控制了该区岩溶塌陷的点状分布特征。

2.2.3　泸沽湖机场岩溶塌陷

泸沽湖机场位于云南省宁蒗县与四川省盐源县交界处，行政区划属云南省宁蒗县永宁乡石佛山村。

（1）地质环境条件

机场位于青藏高原向云贵高原过渡地带，区域地貌基本形态结构是具夷平面的中等切割中—中高山，总体地势北东高南西低。机场区上部覆盖层为第四系残坡积层，岩性主要为黏性土，广泛分布于山坡地、岩溶漏斗、溶蚀洼地等地段，厚度 1.0 ~ 22.3 m，结构松散，富水性弱。下伏地层分布最广的为二叠统阳新组厚层—块状灰岩，岩溶发育强度中—强烈发育，地表发育漏斗、落水洞、溶沟、溶槽，地下溶洞、岩溶管道发育但分布不均匀，垂向裂隙发育导致垂直岩溶较水平岩溶更为发育。机场区及外围地表岩溶发育、大气降水在地表径流途径短，通过岩溶裂隙、漏斗、落水洞等通道下渗补给岩溶地下水，地下水沿大小不等的溶隙、溶孔、溶洞向主岩溶通道汇集，总体向东南方向径流，于山脚地形转折处出露成泉。岩溶含水层中的地下水埋藏较深，水位埋深在地表 400 ~ 500 m 以下（水位标高低于 2 765 m，比跑道整平标高 3 265 m 低 500 m），受季节影响水量变化较大，但无暴涨暴落现象[24]。

（2）基本特征

机场建设前在机场及外围已发育 23 处塌陷，分布于道槽区 1 个，土面区 11 个，其中有 15 个是新近塌陷（图 4）。场区内塌陷一般为土层塌陷，土层的塌陷深度一般 0.6 ~ 3.6 m，平均深度约 2 m，形状大多为不规则圆形或椭圆形，长轴长 1.2 ~ 50 m，平均长 11 m，短轴长 1.1 ~ 20 m，平均 4.7 m。近年以来，机场外围和飞行区的土面区发生多处岩溶塌陷，对机场的构成很大威胁，2020 年底调查发现新形成岩溶塌陷 8 处，均发育在机场跑道北端的北西测[25]。总体来看，塌陷集中分布于中部西侧区域和飞行区土面区，呈现出北东—西南带状展

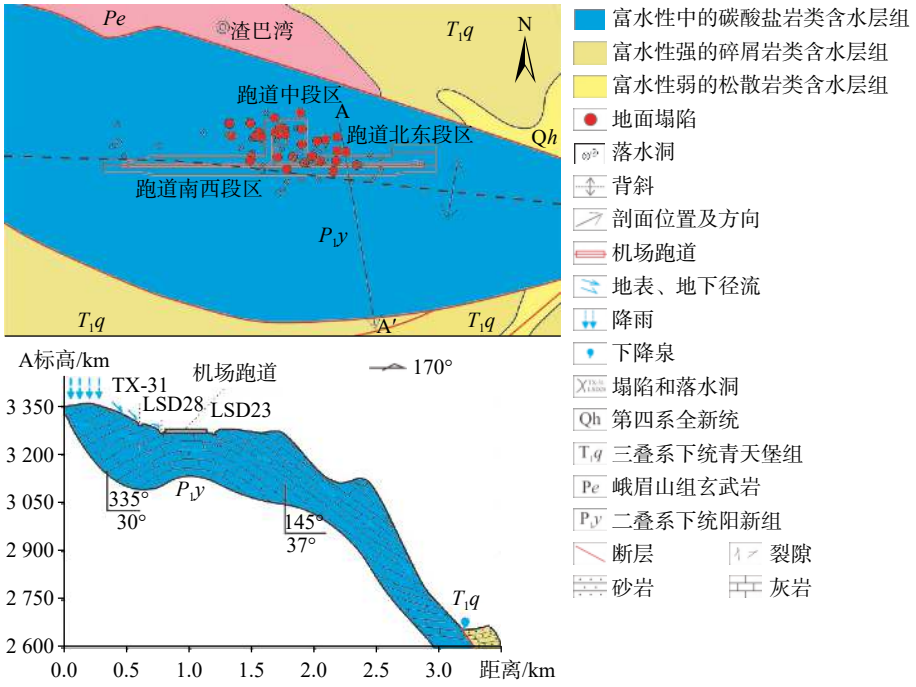


图 4 泸沽湖机场岩溶塌陷平面及剖面图

Fig. 4 Plan and section view of karst collapse in Lugu Lake Airport

布特征，为地下水的强径流带所引发。

(3)成因机制

机场区为古高原面岩溶强发育区，洼地、落水洞密布，地下岩溶以垂直发育为主，为岩溶水的垂向渗入、灌入补给带，天然状态下即有地面塌陷现象，是岩溶塌陷的高易发区。主要成因机制：因表层垂直渗入带岩溶十分发育，大气降水沿地表落水洞和表层垂直裂隙以灌入式和面状垂向渗入快速补给地下水，水力坡度大，进入地下水后循环径流速度快，水动力作用强，不断掏蚀和潜蚀地表土层形成土洞；雨季降雨的集中快速补给使地下水位波动大，造成沿岩溶强发育带上覆土层潜蚀用作加强，土洞逐渐发展；机场建设改变了原降水、地表和地下水径流的途径和转换关系，造成沿岩溶强发育带上覆土层潜蚀作用进一步加强，土洞不断发展至地表形成岩溶塌陷。

该区覆盖层第四系残坡积层岩性以黏性土为主，含少量碎石，硬塑—可塑状，结构以一元结构和二元结构为主，此类岩性和结构组合，在松散层厚度越小时越容易产生岩溶塌陷。下伏基岩为灰岩，岩溶发育强烈但不均匀，地下岩溶裂隙、管道、溶洞发育，为地表水快速转化为地下水、地下水的快速运移以及形成岩溶塌陷提供了空间条件。该区岩溶塌陷的分布与地下岩溶空间分布不均匀相对应，主要表现为“点状”特征，没有成群、成排发育规律。

3 影响及控制因素分析

云南高原岩溶塌陷的基本特征，是在岩溶高原特定的地质环境、岩溶发育、水文地质、水文气象、人类工程活动等因素综合影响和控制作用下形成的，通过这些因素及其作用机制的分析，有助于深入认识高原岩溶塌陷的基本特征、发育规律、发展趋势，为易发性评价和风险评价提供依据。

3.1 宏观地貌影响

宏观地貌成因形态的区域影响作用显著。高原山区、高山峡谷区因高原强烈隆升，大部分岩溶区域为裸露型基岩山区，江河深切，垂直岩溶发育，形成巨厚的垂向径流带，地下水埋藏普遍较深，多数水、气流变化波及不到覆盖层，岩溶塌陷不发育。岩溶区内断陷盆地、岩溶槽谷、岩溶洼地区内覆盖层的厚度和结构特征、基岩岩溶发育特征、水文地质特征等为岩溶塌陷的形成和发展提供了基本条件，发育分布着全省 95% 以上的岩溶塌陷。

3.2 新生代沉积特征制约

新生代沉积特征的制约作用突出。岩溶塌陷易发的岩溶断陷盆地、岩溶槽谷(洼)地、岩溶台地或古高原面，其中沉积的新生界半成岩或松散土覆盖层，在中心地带覆盖层大多厚度较大，多以冲积、洪积、湖积为主，黏性土层占比高，可塑性好、土体固结度高，在地下水

开采等致塌因素强烈影响下，可能会出现地面沉降，但发展形成岩溶塌陷的可能性较小。在边缘地带，覆盖层厚度一般较小，松散覆盖层形成年代短，固结度地，结构较为松散，在地下水位波动、工程活动扰动强烈时，形成岩溶塌陷的可能性较高。但因覆盖层厚度和结构特征不均匀分布、地下岩溶发育强度不均匀、水文地质特征不一致等因素的综合作用，形成的岩溶塌陷多呈点状零星分布，成区、成带趋势不明显，不易产生区（带）性的大规模岩溶塌陷。

3.3　岩溶发育特征限制

岩溶发育特征的限制作用显著。岩溶洞隙为塌陷的塌落物提供了存储运移空间，在一定程度上决定了塌陷发生的位置，下伏基岩岩溶发育强度是地下岩溶洞隙发育数量和规模的重要指标之一。云南岩溶高原总体上岩溶发育不均匀，各向异性突出，局部地下溶洞、岩溶管道、岩溶裂隙发育，但总体上地下岩溶率并不高，引发岩溶塌陷的溶洞、岩溶管道较为孤立分散，限制着岩溶塌陷的形成、发展和分布。

4　结论

（1）云南高原岩溶塌陷主要形成于岩溶断陷盆地、岩溶槽谷（洼）地、岩溶台地或古高原面等松散土覆盖层发育、浅层岩溶洞管发育、汇水条件较好、人类工程活动和地下水开采强度较大的地段。

（2）高原大部分区域为裸露型基岩山区，江河深切，垂直岩溶发育，形成巨厚的垂向径流带，地下水埋藏普遍较深，多数水、气流变化波及不到覆盖层。

（3）岩溶塌陷易发的岩溶断陷盆地、岩溶槽谷（洼）地、岩溶台地或古高原面松散土覆盖层除边缘地带，大多厚度较大，且黏性土层占比高，土体固结度较高，不易产生区（带）性的大规模岩溶塌陷。

（4）岩溶高原总体上岩溶发育不均匀，各向异性突出，岩溶洞、管发育，但总体上地下岩溶率并不高，引发岩溶塌陷的洞、管较为孤立分散。

因此，云南高原岩溶塌陷零星分散，具点状分布特点，总体分布没有成区、成带趋势。

参考文献（References）：

［1］ 中华人民共和国国土资源部. 地质灾害排查规范：DZ/T 0284—2015［S］. 北京：中国标准出版社，2015. ［Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Specification of dynamic survey on geological hazards: DZ/T 0284—2015［S］. Beijing: Standards Press of China, 2015.（in Chinese）］

［2］ 许强，李华，李术才，等. 地质灾害分类分级标准（试行）：T/CAGHP001-2018［S］. 北京：中国地质灾害防治工程行业协会，2018. ［XU Qiang, LI Hua, LI Shucai, et al. Standard of classification for geological hazards: T/CAGHP001-2018［S］. Beijing: China Association of Geological Hazard Prevention, 2018.（in Chinese with English abstract）］

［3］ 王宇，祝传兵，张杰，等. 云南高原山区地质灾害与应急地质工作方法［M］. 昆明：云南科技出版社，2020. ［WANG Yu, ZHU Chuanbing, ZHANG Jie, et al. Geological hazards and emergency geological work methods in Yunnan plateau mountains［M］. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2020.（in Chinese）］

［4］ 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题［J］. 中国岩溶，2015, 34（2）：98－100. ［YUAN Daoxian. Scientific innovation in Karst resources and environment research field of China［J］. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 98－100.（in Chinese with English abstract）］

［5］ 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带［J］. 中国岩溶，2018, 37（1）：1－8. ［WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau［J］. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 1－8.（in Chinese with English abstract）］

［6］ 铁永波，徐勇，张勇，等. 南方山地丘陵区地质灾害调查工程主要进展与成果［J］. 中国地质调查，2020, 7（2）：1－12. ［TIE Yongbo, XU Yong, ZHANG Yong, et al. Main progresses and achievements of geological hazards survey in hilly area of Southern China［J］. Geological Survey of China, 2020, 7(2): 1－12.（in Chinese with English abstract）］

［7］ 杨迎冬，晏祥省，王宇，等. 云南省地质灾害特征及形成规律研究［J］. 灾害学，2021, 36（3）：131－139. ［YANG Yingdong, YAN Xiangsheng, WANG Yu, et al. The characteristics and formation of geological hazards in Yunnan Province［J］. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 131－139.（in Chinese with English abstract）］

［8］ 康彦仁，项式均，陈建，等. 中国南方岩溶塌陷［M］. 南宁：广西科技出版社，1990. ［KANG Yanren, XIANG Shijun, CHEN Jian, et al. Karst collapse of South China［M］. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1990.（in Chinese with English abstract）］

［9］ 邹成杰，张汝清，光耀华，等. 水利水电岩溶工程地质［M］. 北京：水利电力出版社，1994. ［ZOU Chengjie, ZHANG Ruqing, GUANG Yaohua, et al. Water conservancy and hydropower karst engineering geology［M］. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1994.（in Chinese）］

［10］ 余政兴，金福喜，段选亮. 河床透-阻型岩溶塌陷形成机理［J］. 中国地质灾害与防治学报，2020, 31（2）：57－66. ［YU Zhengxing, JIN Fuxi, DUAN Xuanliang. Formation mechanism of karst collapse with unconfined aquifer-aquitaed system in riverbed［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 57－66.（in Chinese with English abstract）］

[11] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶塌陷研究现状及趋势分析[J]. 中国岩溶, 2019, 38(3): 411－417. [MENG Yan, LEI Mingtang. Analysis of situation and trend of sinkhole collapse[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 411－417. (in Chinese with English abstract)]

[12] 房浩, 李巧灵, 雷晓东, 等. 平原区深层隐伏岩溶塌陷主控因子地球物理调查方法适用性分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 153－160. [FANG Hao, LI Qiaoling, LEI Xiaodong, et al. Applicability of geophysical survey methods for the main controlling factors of deep covered karst collapse in plain areas[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 153－160. (in Chinese with English abstract)]

[13] 陈标典, 李喜, 李祖春, 等. 湖北武汉白沙洲隐伏岩溶区地质结构与岩溶塌陷分类[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 43－52. [CHEN Biaodian, LI Xi, LI Zuchun, et al. Types of geological structures and mechanism of karst collapses in Baishazhou, Wuhan City of Hubei Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 43－52. (in Chinese with English abstract)]

[14] 郭宇, 周心经, 郑小战, 等. 广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 54－59. [GUO Yu, ZHOU Xinjing, ZHENG Xiaozhan, et al. Analysis on formation mechanism and process of karst collapse in Xiamao Village, Guangzhou City of Guangdong Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 54－59. (in Chinese with English abstract)]

[15] 韩庆定, 罗锡宜, 易守勇, 等. 广东佛山市高明区三洲盆地岩溶塌陷发育特征与时空分布规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021(3): 131－139. [HAN Qingding, LUO Xiyi, YI Shouyong, et al. Characteristics and spatial-temporal distribution law of karst collapse in Sanzhou basin in Gaoming District of Foshan City, Guangdong Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021(3): 131－139. (in Chinese with English abstract)]

[16] 江思义, 吴福, 刘庆超, 等. 广西桂林市规划中心城区岩溶塌陷时空分布规律及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 65－72. [JIANG Siyi, WU Fu, LIU Qingchao, et al. Spatial-temporal distribution and causes of karst collapse in Guilin planning center, Guangxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 65－72. (in Chinese with English abstract)]

[17] 王宇. 云南省地质灾害防治与研究历史评述[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 134－139. [WANG Yu. Historical review of geological disaster prevention and research in Yunnan Province, China[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 134－139. (in Chinese with English abstract)]

[18] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 5－13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the karst mountain areas of Southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 5－13. (in Chinese with English abstract)]

[19] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 114－119. [WANG Yu. Classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in Southwest China karst area[J]. Carsologica Sinica, 2002, 21(2): 114－119. (in Chinese with English abstract)]

[20] 彭淑惠, 王宇, 张世涛. 昆明岩溶断陷盆地的环境地质问题及治理对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(2): 98－103. [PENG Shuhui, WANG Yu, ZHANG Shitao. The environmental and geological problems and the countermeasures of the karst fault basin in Kunming[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, 19(2): 98－103. (in Chinese with English abstract)]

[21] 王宇, 张贵, 张华, 等. 云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018. [WANG Yu, ZHANG Gui, ZHANG Hua. Karst hydrogeological environment geological survey and research in Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)]

[22] 云南省地矿局第一水文地质工程地质大队. 昆明地区城市地质环境综合评价研究[R]. 昆明: 云南省地质矿产局, 1990. [The First Hydrogeological Engineering Geological Brigade of Yunnan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. research on comprehensive evaluation of urban geological environment in Kunming[R]. Kunming: Yunnan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. (in Chinese)]

[23] 邓启江, 李星宇, 吕琼, 等. 昆明市岩溶塌陷发育特征和防治措施[J]. 中国岩溶, 2009, 28(1): 23－29. [DENG Qijiang, LI Xingyu, LYU Qiong, et al. Development characters and prevention measures of the karst collapse in Kunming[J]. Carsologica Sinica, 2009, 28(1): 23－29. (in Chinese with English abstract)]

[24] 杨永峰. 泸沽湖机场工程区地质构造对岩溶发育的控制及工程影响[D]. 成都理工大学, 2011. [YANG Yongfeng. Geological construction control factors of karst development and project effect for Lugu lake area airport[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)]

[25] 黄奇波, 覃小群, 李腾芳, 等. 云南省丽江市泸沽湖机场岩溶水文地质调查与塌陷易发性评价工作方案[R]. 桂林: 中国地质科学院岩溶地质研究所. 2020. [HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LI Tengfang, el al. Work plan for karst hydrogeological investigation and collapse susceptibility evaluation of Lugu lake airport in Lijiang City, Yunnan Province[R]. Guiling: Institute of Karst Geology, CAGS. 2020. (in Chinese)]