

叶浩, 周云, 房艳国, 等. 鹤庆—剑川地区岩溶发育特征及其控制因素[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 19–26. [YE Hao, ZHOU Yun, FANG Yanguo, et al. The Development Characteristics and Controlling Factors of Heqing–Jianchuan Karst [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 19–26]

鹤庆—剑川地区岩溶发育特征及其控制因素

叶浩¹, 周云¹, 房艳国¹, 罗文行¹, 吴海斌², 翁文林², 付兴伟²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

摘要:滇中鹤庆—剑川地区碳酸盐岩岩溶极为发育, 其空间展布广, 以连续纯碳酸盐岩型岩溶层组类型为主, 岩溶形态多样, 包括溶蚀平原、溶丘谷地、溶丘洼地等类型。滇中鹤庆—剑川岩溶系统具有沿断裂走向展布的显著特点, 同时沿断层、褶皱轴部和构造裂隙岩溶发育程度明显较大。结合区域地质构造背景, 研究认为鹤庆—剑川地区岩溶系统的发育主要受控于物质基础(可溶性岩石)和区域构造活动的影响。连续纯碳酸盐岩型岩溶层组为区域性的岩溶作用提供了良好的物质基础。构造活动对岩溶系统的影响, 一方面包括构造活动产生的一系列断层及褶皱, 包括同期的构造裂缝, 增强了流体的运移流通能力和流体—岩石接触的比表面积, 另一方面, 新生代以来的构造运动使得青藏高原发生持续的构造隆升, 这改变了区域内的地理气候环境, 尤其是降水量和植被的发育, 也是岩溶系统发育的重要因素之一。

关键词: 鹤庆—剑川盆地; 岩溶系统; 碳酸盐岩; 构造活动

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2021)02-0019-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.02.03

The Development Characteristics and Controlling Factors of Heqing–Jianchuan Karst

YE Hao¹, ZHOU Yun¹, FANG Yanguo¹, LUO Wenxing¹, WU Haibin²,
WENG Wenlin², FU Xingwei²

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. China Three Gorges Corporation Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Carbonate karst is extremely developed in Heqing–Jianchuan area of central Yunnan province, and its spatial distribution is wide, which is mainly composed of continuous pure carbonate karst layer groups. The karst morphology is various, including the dissolution plains, dissolved mound valleys, karst hills and depressions and so on. The Heqing–Jianchuan karst system in central Yunnan is characterized by the distribution along the fault strike, and the karst development along the fault, the axis of the fold and the structural fissure is obviously larger. Combined with the regional geological background, the study concluded that the development of

收稿日期: 2020-09-20

基金项目: 国家重点研发计划: 隧洞穿越活断层围岩-衬砌灾变机制及抗断技术(2016YFC0401803)

作者简介: 叶浩(1986–), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事区域构造研究。

E-mail: yehao1986@qq.com.

the karst system in Heqing–Jianchuan area is mainly controlled by the influence of the material foundation (soluble rocks) and the regional tectonic activities. The continuous pure carbonate-type karst layer group provides a good material basis for regional karstification. On the one hand, the impact of tectonic activities on the karst system includes a series of faults and folds generated by tectonic activities, including tectonic fractures in the same period, which enhances the fluid migration and flow capacity and the specific surface area of fluid–rock contact. On the other hand, the tectonic movement since the Cenozoic has caused continuous structural uplift of the Qinghai–Tibet Plateau, which has changed the geographical and climatic environment in the region, especially precipitation and vegetation development, which is also one of the important factors for the development of karst systems.

Keywords: Heqing–Jianchuan basin; Karst system; Carbonate rock; Tectonic movement

0 引言

我国是岩溶发育最为广泛的国家之一,尤其在滇、黔地区,岩溶地层以碳酸盐岩为主,由于气候湿热、降水丰沛,岩溶作用强烈,溶孔、溶隙、溶洞及暗河水系十分发育,形成极具特色的岩溶系统^[1-5]。岩溶区通常存在复杂的地下洞穴和暗河系统,在岩溶区施工长大隧道不可避免地会使当地岩溶水系统发生改变,如地下水水位的下降、地表泉点的漏失等,极易引发隧洞涌水、突泥和岩溶崩塌等工程地质问题^[6-8]。岩溶系统在空间上的展布规律是认识岩溶系统的基础,其控制因素则是最根本问题,也是工程地质关注的重点。

对于滇中鹤庆—剑川地区岩溶系统,其发育特征及其控制因素是该地区岩溶系统的重要科学问题之一。本文拟总结鹤庆—剑川岩溶系统的发育特征,并讨论影响岩溶系统发育的主要控制因素,为深入认识研究区岩溶系统及工程实践提供参考。

1 研究区概况

鹤庆—剑川位于云南省中部,大地构造位置上位于扬子地台盐源—丽江台缘凹陷鹤庆—洱海台褶束、中甸褶皱束和云岭褶皱带维西褶皱束、以及滇藏歹字形构造体系中的鹤庆西部构造区黑泥哨褶皱断区复合部位。受印度板块向北倾伏俯冲挤压作用^[9-11],研究区历经多期构造的复合作用和以板块活动为特点的新构造活动,地质构造十分复杂。主要表现为以近南北向构造带与北北东—北东向构造带为基本骨架,复合有近东西向构造的构造格局^[12],表现为断裂构造发育,褶皱构造一般规模较小。区域地层发育较为完整,除侏罗系、白垩系地层缺失外,从寒武纪至第四纪地层均有

不同程度出露。其中分布范围较广的地层包括二叠系、三叠系以及古近系地层,同时碳酸盐岩在该区的古生界—新生界地层中普遍存在并分布广泛。

鹤庆—剑川区内共发育六大岩溶系统,分别为白汉场岩溶系统、拉什海岩溶系统、文笔海岩溶系统、鹤庆—西山岩溶系统、清水江—剑川岩溶系统和南溪—拉郎岩溶系统,总体走向为北东—北西向(图1)。

2 岩溶发育特征

2.1 岩溶层组类型

研究区出露的主要岩溶地层有志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系和古近系。根据岩性组合特点,可将研究区岩溶层组类型划分为4种类型:(1)连续纯碳酸盐岩型、(2)碳酸盐岩夹非碳酸盐岩型、(3)碳酸盐岩与非碳酸盐岩互(间)层型和(4)非碳酸盐岩夹碳酸盐岩岩溶层组。其中以(1)和(2)为主,(3)和(4)在本区分布并不普遍。

区域内属于(1)型岩溶层组类型的主要有石炭系中统和上统灰岩,二叠系下统灰岩、硅质灰岩,三叠系北衙组中上段灰岩、白云岩、白云质灰岩。其中,三叠系北衙组中上段的灰岩、白云质灰岩和白云岩在研究区出露最广,连续厚度均在100 m以上。其岩溶作用发育强烈,表现在地表以峰丛洼地、峰丘洼地(或谷地)为主,大型岩溶洼地、落水洞、岩溶漏斗和岩溶塌陷分布普遍,地下多发育岩溶管道或地下河,有众多岩溶大泉出露地表。

在研究区内属于(2)型岩溶层组类型的主要有泥盆系青山组 and 上三叠统中窝组。泥盆系青山组为含硅质、泥质夹层的灰岩,其上部碳酸盐岩连续性较好,分布区岩溶发育强烈,地表多发育浅

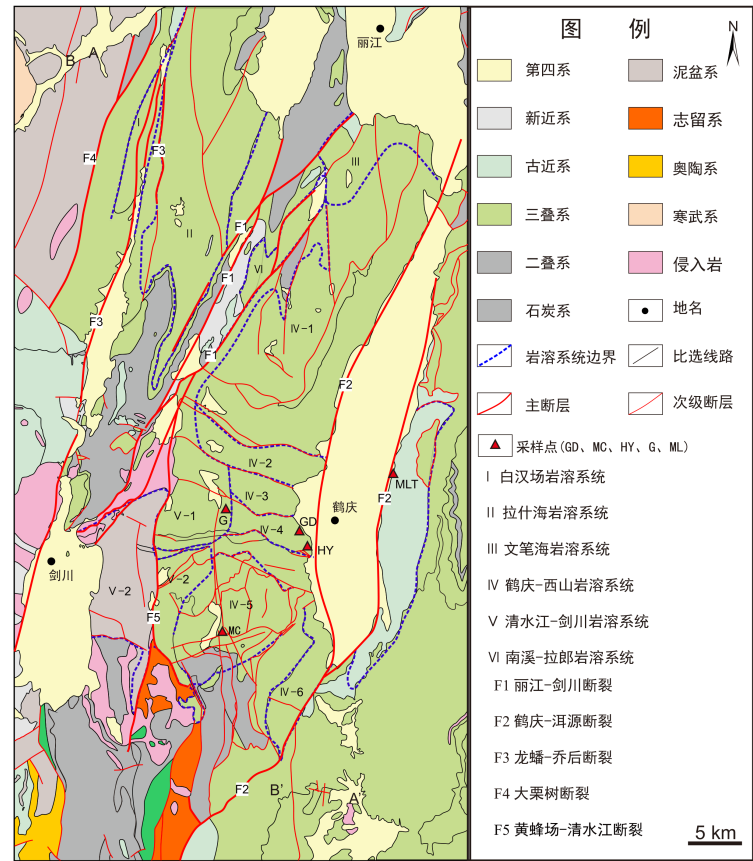


图 1 鹤庆—剑川地区地质简图及岩溶系统分布

Fig.1 Geological sketch map and karst system distribution in Heqing-Jianchuan area

蝶形洼地、谷地，属于强岩溶层组。

丽江组主要分布于鹤庆东坡，为一套紫色块状石灰质角砾岩、薄至中层状细粒石英砂岩及砂质页岩，其中的紫色块状石灰质角砾岩属于不纯碳酸盐岩，因此，其属于不纯碳酸盐岩互层型，其岩溶发育中等，在盆地边多发育有中、小规模岩溶泉，泉数量多、单泉流量小。非碳酸盐岩夹碳酸盐岩岩溶层组岩溶层组类型有泥盆系莲花曲组，岩性为灰色页岩夹燧石结核灰岩、生物灰岩，岩溶不发育，地表主要为侵蚀地貌，可归属于非碳酸盐岩隔水层组。

2.2 岩溶形态

岩溶发育具有明显的空间上分异性，主要表现在岩溶发育形态特征、规模等方面存在明显的空间分异性。区内岩溶地貌组合形态包括溶蚀平原、溶丘谷地、溶丘洼地、溶蚀边缘谷地、岩溶斜坡或陡崖等类型。

2.2.1 溶蚀平原

主要分布在拉市海及其西南的拉市海复式向

斜核部，安乐坝、沙子坪、马厂、黄蜂厂等大型溶蚀洼地总体上可以归属于溶蚀平原类。这些溶蚀平原均分布在北衙组泥质灰岩为主的岩溶层组中，构造上主要位于向斜核部，岩溶破碎程度高。溶丘谷地包括溶丘谷地和岭丘谷地两种，均受线状构造控制。

2.2.2 溶丘谷地

见于老凹各、马厂东山、安乐坝北部、剑川东山山顶、鲁秃南部和银河水库—河底村附近和丽江海西等地，以长条形洼地与溶丘(或连底座的孤立溶丘)相间排列为特征，溶丘坡顶平滑。在老凹各受北西、北东两组破碎带的控制，形成棋盘式溶丘与谷地格局。在鲁秃—寒镜落之间，北北西和近南北向相间排列的溶丘与谷地最为发育。岭丘谷地表现为长条形溶蚀山岭与溶蚀谷地相间分布，山体规模较大。

2.2.3 溶丘洼地

在研究区分布较广，北至文笔海以南的五台山—立子课一带，中部扣潭—争都、下马塘—安乐坝，西南部的新华—黄蜂厂—背马厂—东甸—

带,以及马厂东山等地均有分布。溶丘洼地的形成大多数与棋盘式构造格局,即两组平行构造(包括大型共轭节理、横穿紧密褶皱的破碎带等)大角度交汇有关。

2.2.4 溶蚀边缘谷地

溶蚀边缘谷地是指在可溶岩与非可溶岩接触界面附近,尤其是可溶岩与非可溶岩接触界面,形成的长条形溶蚀谷地。在研究区较为常见。典型的溶蚀边缘谷地有分布于马厂东山沿青石崖断裂形成的千里居—春山坡北边缘谷地、寒镜落南部边缘谷地等。

2.2.5 岩溶斜坡或溶蚀陡崖

主要分布于断陷盆地边缘,如剑川盆地东坡、鹤庆盆地西山坡等,其形态表现为坡度较陡的溶蚀坡面或陡崖,其上可见光滑的溶蚀面和沿坡面分布的平行溶蚀沟谷、溶槽等岩溶形态。

2.3 岩溶优势发育带

岩层界面,尤其碳酸盐岩与非碳酸盐岩接触界面附近,水—岩交互作用活跃,岩溶作用尤其强烈,通常发育侵蚀—溶蚀谷地,称为“岩溶边缘谷地”。边缘谷地地貌形态上表现为沿岩性接触界面形成的长条型负地形,在碎屑岩一侧地形平

缓,而在碳酸盐岩一侧通常地形陡峻,多有陡崖,并发育一个或多个落水洞。典型的如锰矿厂地下河主管道即沿千里居—春山坡北—干海子岩溶边缘谷地附近发育。研究区具有此类岩溶空间发育、分布规律的还有马厂东甸边缘谷地、剑川黄蜂厂谷地,乃至清水江谷地、汝南河谷地和白汉场—九河谷地、河底—白土坡谷地、马厂堆煤场谷地、田房谷地、寒镜落谷地等。沿碳酸盐岩与非碳酸盐岩接触界面发育的另一种比较普遍的岩溶现象是沿线发育线状排列的岩溶泉、地下河或溶洞。此类岩溶现象的形成通常是地下水从碳酸盐岩分布区向碎屑岩分布区运移,遇碎屑岩阻水后出露地表,并形成规模较大的溶洞。

区内岩溶系统有明显的沿构造带岩溶强烈发育的特点(图 1),主要包括褶皱轴部或转折端,断层叠置汇聚和构造裂缝。褶皱轴部或转折端往往岩石较为破碎,岩溶发育较为强烈。岩溶发育顺背斜轴部或向斜核部发育较明显的见于研究区西北的高美古、汝寒坪、香炉山一线,沿香炉山次向斜轴部,发育有岩溶谷地,有线性排列的岩溶塌坑、漏斗分布和大型岩溶洼地、湖泊。例如,鲁秃山向斜为一轴向北北东向、向北抬起的向斜,

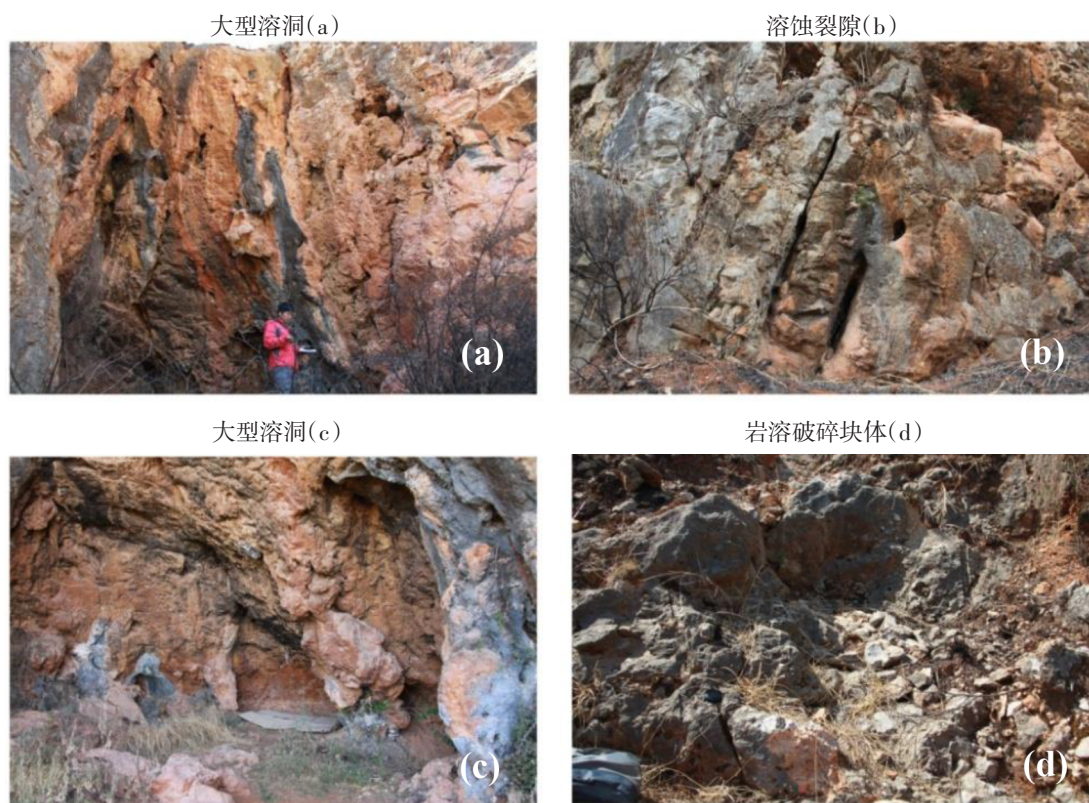


图 2 鹤庆—剑川地区沿 NW 向破碎带发育的岩溶负地形

Fig.2 Karst negative topography developed along the NW fracture zone in the Heqing-Jianchuan area

受两翼及向斜抬起端岩溶发育较差的二叠系和三叠系泥质灰岩、泥灰岩及非碳酸盐岩含水层组(碎屑岩)控制,地表水、地下水总体上沿向斜核部由北向南运移。在鲁秃—寒镜落之间的向斜核部,发育有古岩溶干谷(古河道),谷地底部遍布岩溶塌坑、漏斗,表明向斜核部岩溶发育强烈。

在两断层交汇处附近,岩石破碎程度更高,岩溶发育最为强烈,通常形成典型的岩溶负地形,包括大型岩溶洼地、落水洞、岩溶塌坑等(图 2)。典型的如沙子坪、下马塘、安乐坝、马厂、石灰窑、打板菁等大型岩溶洼地,即是沿中部张性断裂破碎带与近东西向推覆构造交汇处或多个断层交汇、夹持形成的岩溶破碎块体中发育。与此类似,在断层与大型密集型构造裂隙交汇处,岩溶发育也十分强烈,在研究区内更具有代表性。如在剑川盆地东山或鹤庆盆地西山脚,区域性深大断裂(剑川—丽江断裂带、洱源—鹤庆断裂)经多次继承性活动及北西向断层的错断,带内岩石破碎,岩溶极为发育(图 2d)。大型溶洞或岩溶泉均发育于近南北向区域深大断裂带与北西向张性破碎带交汇处。典型的如鹤庆西山仕庄龙潭—小龙潭—大龙潭一线山脚和山坡近南北向大断裂带附近,与北西走向破碎带(密集节理)交汇处发育有天子庙清玄洞、大龙潭新石洞上下洞等多个 NW 走向规模较大的溶洞(图 2a、c)。同时,研究区内岩溶程度沿北东和北西的两组构造裂隙最为发育。如在鹤庆西山小龙潭—大龙潭之间的西山坡,北西向节理或破碎带密集发育,其走向为 295°~310°,沿该破碎面、节理的岩溶作用极为发育,形成宽 5~50 cm 的大型溶蚀裂隙(图 2b)和岩房。

3 岩溶系统的控制因素

3.1 物质基础

岩溶作用发生的首要条件是存在可溶性岩石。研究区可溶岩主要是碳酸盐岩,主要分布在志泥盆系、三叠系和古近系的不同时代地层中(表 1),以滨海—浅海相沉积建造为主,丽江组可能属于山前盆地相沉积,是碳酸盐岩在陆相沉积环境中的再堆积。岩石的可溶解性主要取决于其化学成分和矿物晶体结构或岩石破碎性等几大因素。不同化学成分的岩石可溶性强度有较大的差异。一般就溶解度而言,卤化物>硫酸盐岩>碳酸盐岩^[13-14]。碳酸盐岩虽然溶解度比起卤化物和硫酸盐低,但在自然界中分布最广,是自然界中的岩溶现象主要发生对象^[15-17]。研究区的可溶岩均为各类碳酸盐类岩石,包括石灰岩、白云岩及其之间的过渡类型白云质灰岩、灰质白云岩。其中,灰岩溶解度较高,而白云岩的溶解度稍差。一般而言,碳酸盐岩中 CaO/MgO 比值越高,岩石溶解度越高^[13]。研究区内分布有灰岩、白云岩、泥质灰岩和钙质泥岩等不同类型的碳酸盐岩,其 CaO、MgO 和酸不溶物等成分的测试结果见表 2。从表 2 中可以看出,岩溶发育强度:灰岩>白云岩>泥质灰岩或钙质泥岩。实际上,造成灰岩岩溶发育强度大于白云岩岩溶发育强度的是方解石与白云石的矿物结构(包括晶格能)所决定的矿物溶解度,而晶格能是指示结晶物质的稳定性能和牢固度指标。方解石的晶格能比白云石的低,显然更容易被溶解^[18]。

表 1 鹤庆—剑川地区可溶岩地层及分布
Table 1 Characteristics and distribution of soluble strata in Heqing-Jianchuan area

时代	地层(代号)	岩性	分布
第三系	丽江组(N ₂ l)	浅灰色、紫红色厚层灰质角砾岩,角砾成分主要为灰岩块体,分选较好,磨圆差,另外可见砂岩、页岩、玄武岩等岩性的碎屑物充填	鹤庆东山
	上统 中窝组(T ₃ z)	底部具有铝土矿层,下部由泥质灰岩,生物碎屑灰岩,鲕状灰岩组成,上部为灰黑色中厚层状燧石灰岩,厚层块状灰岩	鹤庆南部中窝一带、马厂及丽江鹤庆盆地西山、鹤庆东山
	中统 北衙组(T ₂ b)	下段为灰黑色中厚层状泥质灰岩夹少量粉砂岩及页岩,上段为浅灰色厚层至巨厚层白云岩,白云质灰岩和灰岩。	鹤庆西山,马厂
泥盆系	莲花曲组(D ₁ l)	灰色页岩夹燧石结核灰岩,生物碎屑灰岩	黄蜂厂西北部,呈东西向展布
	下统 青山组(D ₁ q)	深灰色中厚层块状粒屑灰岩、条带状灰岩,珊瑚礁灰岩及礁角砾岩。	剑川东部

表 2 研究区不同碳酸盐岩岩石化学成分分析结果(单位: %)
Table 2 Geochemical composition of different kind of carbonate rocks in the study area (unit: %)

送样编号	采样位置	岩性	地层代号	检验结果: (ωB/10 ⁻²)				地表岩溶发育强度
				CaO	MgO	CaO/MgO 比 (相对溶解度)	酸不溶物/ 烧失量	
GD-01	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	55.40	0.54	102.6	0.20	强烈
GD-02	鹤庆谷堆山	白云质灰岩	T ₂ b ²	43.09	11.00	3.9	0.076	较强烈
GD-03	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	55.41	0.62	89.4	0.18	强烈
GD-05	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	55.42	0.61	89.4	0.098	强烈
GD-06	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	55.42	0.58	95.6	0.064	强烈
GD-07	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	52.68	2.87	18.4	0.10	较强烈
GD-09	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	54.40	0.92	59.1	1.38	强烈
GD-10	鹤庆谷堆山	灰岩	T ₂ b ²	47.02	7.71	6.1	0.052	较强烈
MC-01	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	34.14	18.51	1.8	0.13	中等
MC-02	鹤庆马厂东山	灰岩	T ₂ b ²	55.13	0.87	61.1	0.060	强烈
MC-03	鹤庆马厂东山	灰岩	T ₂ b ²	55.16	0.85	64.9	0.087	强烈
MC-04	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	33.77	18.82	1.8	0.068	较强烈
MC-05	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	33.19	19.41	1.7	0.037	中等
MC-06	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	34.13	18.47	1.85	0.081	较强烈
MC-07	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	31.06	21.05	1.5	0.22	较强烈
MC-08	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	30.79	21.03	1.5	0.78	中等
Liang1	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	31.42	17.64	1.8	0.11	较强烈
Liang2	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	30.80	20.42	1.5	0.14	较强
Liang3	鹤庆马厂东山	白云岩	T ₂ b ²	30.83	14.55	2.1	1.61	强烈
MC-10	鹤庆马厂东山	碎屑岩	T ₁ q	0.98	1.80	0.5	77.98	无
HY-01	鹤庆和邑村	白云岩	T ₂ b ²	32.92	18.45	1.8	2.11	中等
HY-02	鹤庆和邑村	白云岩	T ₂ b ²	32.82	18.81	1.7	1.32	中等
HY-03	鹤庆和邑村	白云岩	T ₂ b ²	33.50	19.07	1.8	0.23	中等
HY-04	鹤庆和邑村	灰岩	T ₂ b ²	55.31	0.67	82.6	0.10	强烈
HY-05	鹤庆和邑村	灰岩	T ₂ b ²	55.11	0.87	63.3	0.26	强烈
HY-08	鹤庆和邑村	白云岩	T ₂ b ²	33.63	18.93	1.8	0.67	中等
G1-1	石灰窑	白云岩	T ₂ b ²	36.42	13.46	2.7	3.08/44.50	中等
G1-2	石灰窑	白云岩	T ₂ b ²	20.91	12.06	1.7	32.3/31.16	中等
G1-3	石灰窑	白云岩	T ₂ b ²	27.41	14.46	1.9	13.96/39.94	中等
G1-4	石灰窑	白云岩	T ₂ b ²	30.71	18.26	1.7	3.45/45.53	中等
G73	安乐坝	泥岩	T ₂ b ²	4.48	3.78	1.2	76.5/3.19	无
G74-1	安乐坝	泥灰岩	T ₂ b ²	39.78	10.39	3.8	1.98/44.56	弱
G76-2	安乐坝	泥灰岩(钙质泥岩?)	T ₂ b ²	2.92	2.22	1.3	17.85/19.52	弱
MLT-1	鹤庆美龙潭坡	灰质角砾岩	E ₂ l	47.18	2.56	18.4	8.38/40.46	中等

3.2 构造作用

研究区大地构造上位于扬子准地台丽江台缘褶皱带与松潘—甘孜褶皱系两大构造单元边界处,印度板块与欧亚板块结合处附近。由于印度板块自南向北、自西南向东北方向向欧亚板块的俯冲,以及太平洋板块自东向西向欧亚板块的俯冲,在西藏高原至中南半岛形成了自东向转近南北、再转东南方向的“反S”型构造体系。研究区位于该构造区中部,滇藏“歹”字形构造体系与三江南北向构造体系的复合部位,构造形迹以近南北向、北北西向构造(区域大断裂、褶皱系)为主、东西向构造为辅。北北西—近南北褶皱有中甸褶皱带、兰坪—思茅褶皱系(构造凹陷)、云岭褶皱带和北北东向的丽江台缘褶皱带,断裂构造以怒江深断裂带、澜沧江深断裂带、兰坪—永平断裂带、维西—巍山断裂带和金沙江深断裂带为代表^[19-21]。

鹤庆—剑川岩溶系统的走向在空间上以北东—北西向为主,基本与区域内主构造线走向一致,同时单个岩溶系统多以断裂为边界,这些特征说明区域内的岩溶系统的发育与构造活动有关,尤其是区域性大断裂。同时就岩溶形态而言,不同的岩溶形态是岩溶发育程度的反映。研究区内岩溶高度发育的溶丘谷地或岭丘谷地,其空间分布受地质构造,尤其是平行或格网状分布的构造格局的控制。其中,谷地多沿构造破碎带发育,以近东西向(推覆构造体)、北东与北西向共轭破碎带分布区内最发育。如白龙潭—西龙潭以西至安乐坝之间的条形岩溶山地与沿东西向断层、岩性软弱的碎屑岩形成的侵蚀、溶蚀谷地相间分布;老凹各沿北东与北西向共轭破碎带发育的溶丘或峰丘谷地最为典型。

该区的构造活动控制岩溶系统的发育主要表现在两个方面。其一,断裂带内部,褶皱轴部破碎程度高,裂缝发育^[22]。断裂带是流体运移的良好通道,构造裂缝是连通岩层的极佳的媒介,这不仅增大了流体—岩石接触的表面积,同时也增强了岩石的透水性,进而影响岩溶作用在靠近断裂带及褶皱轴部尤为剧烈。另一方面影响了区域性气候环境,进而影响岩溶系统的发育^[11,23-24]。青藏高原的隆升是新生代以来全球最为重要的地质事件之一,对亚洲乃至全球气候演化产生了深刻的影响^[11,23-24]。对于云南地区而言,青藏高原的构造抬升改变了云南地区的气候环境,尤其是降水和

植被方面。区域性降水量的增大,及地表高度覆盖的植被,也能大大增强岩溶程度。

4 结语

鹤庆—剑川岩溶系统具有以下特点:①连续纯碳酸盐岩型和碳酸盐岩夹非碳酸盐岩型的岩溶层组类型在区域内占据主要地位,这为岩溶发育提供了良好的物质基础;②岩溶沿碳酸盐岩与非碳酸盐岩接触界面及盆地边缘发育;③岩溶系统的走向总体上与区域内的构造发育基本一致,具体表现在岩溶顺张性断层带或压扭性断层的一侧,褶皱轴部及构造裂缝发育强烈。结合该区域地质背景,研究认为鹤庆—剑川岩溶区主要受控于岩溶物质基础和构造活动影响。可溶性岩石是岩溶区重要的物质基础,而碳酸盐岩在该区分布广泛,且连续纯碳酸盐岩型是该区重要的岩溶层组类型,这为该区的岩溶发育提供了极佳物质基础。构造活动对岩溶系统的影响,一方面构造活动产生的一系列断层及褶皱,包括同期的构造裂缝,增强了流体的运移流通能力,另一方面青藏高原的隆升改变了区域内的气候环境,尤其是降水量和植被的发育,是岩溶系统发育的重要因素之一。

参考文献:

- [1] 罗传华,昌彦君,郭宁宁,等. 高分辨电阻率法在云南岩溶地区地下水勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(3): 402-405.
- [2] 李瑞玲,王世杰. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [3] 张竹如,陈黎明. 贵州岩溶石漠化地区生态环境恢复的初步研究—贵阳黔灵山的启示[J]. 中国岩溶, 2001, 20(4): 310-314.
- [4] 杨明德. 论贵州岩溶水赋存的地貌规律性[J]. 中国岩溶, 1982(2): 4-14.
- [5] 彭淑惠. 云南岩溶区地下水及地质环境数据库建设[J]. 云南地质, 2005, 24(2): 232-239.
- [6] 曹文贵,李媛,翟友成. 基于 Info-Gap 理论的基桩下伏岩溶顶板稳定性的主动分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(2): 393-400.
- [7] 周毅,李术才,李利平,等. 隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流—固耦合模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015(9): 1739-1749.
- [8] 周宗青,李术才,李利平,等. 岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J]. 岩土力学, 2013(3): 818-826.
- [9] 傅容珊,李力刚,黄建华,等. 青藏高原隆升过程的三阶

- 段模式[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 609-617.
- [10] 王成善, 丁学林. 青藏高原隆升研究新进展综述[J]. 地球科学进展, 1998, 13(6): 526-532.
- [11] 张克信, 林晓, 王国灿, 等. 青藏高原新生代隆升研究现状[J]. 地质通报, 2013, 32(1): 1-18.
- [12] 黄培华. 云南新构造运动的特点与大地构造关系[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1959(7): 51-64.
- [13] 刘再华, W.Dreybrodt, 李华举. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2006(3): 131-136.
- [14] 孟繁贺, 米德才, 陈云生. 石灰岩与白云岩岩溶发育特征浅析[J]. 西部交通科技, 2015(4): 43-45.
- [15] 张海潮, 吴基文, 翟晓荣, 等. 临涣矿区太原组灰岩岩溶发育控制因素研究[J]. 煤矿开采, 2015(3): 25-27, 6.
- [16] 王第连, 钱小鄂. 柳州白云岩微溶蚀特征[J]. 贵州科学, 1992(2): 8-16.
- [17] 郑晨, 吴基文, 路飞. 宿县矿区太原组灰岩岩溶发育特征[J]. 地下水, 2014(6): 47-49.
- [18] 周志华, 温元凯. 无机盐在水中溶解度的规律性[J]. 化学通报, 1981(5): 19-23.
- [19] 张远泽. 川滇地块东部主要活动断裂新生代精确构造年代格架及其对青藏高原东缘新生代动力学过程的启示[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015: 115.
- [20] 刘凤山, 吴中海, 张岳桥, 等. 青藏高原东缘新构造与活动构造研究新进展及展望[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 403-418.
- [21] 马宗晋, 张家声. 青藏高原三维变形运动学的时段划分和新构造分区[J]. 地质学报, 1998, 72(3): 211-227.
- [22] 宋瑞刚, 张顶立, 文明. 穿越断层破碎带深埋隧道围岩失稳的突变理论分析[J]. 土木工程学报, 2015(S1): 289-292.
- [23] 刘晓东, DONG Buwen. 青藏高原隆升对亚洲季风-干旱环境演化的影响[J]. 科学通报, 2013, 58(28): 2906-2919.
- [24] 李吉均. 青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J]. 兰州大学学报(自科版), 2013(2): 154-159.