引用格式：张皓月，姜群鸥，张绪教，等，2025. 河北兴隆国家地质公园溶洞的成因及时代探讨[J]. 地质力学学报，31（2）：278−286. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024136

Citation: ZHANG H Y，JIANG Q O，ZHANG X J，et al.，2025. The genesis and age of karst caves in Xinglong National Geopark, Hebei Province[J]. Journal of Geomechanics，31（2）：278−286. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024136

河北兴隆国家地质公园溶洞的成因及时代探讨

张皓月[1]，姜群鸥[1]，张绪教[2]，王　姗[1]

ZHANG Haoyue[1]，JIANG Qunou[1]，ZHANG Xujiao[2]，WANG Shan[1]

1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；
2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083
1. *School of Soil and Water Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*;
2. *School of Earth Science and Resources*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*

The genesis and age of karst caves in Xinglong National Geopark, Hebei Province

Abstract: ［**Objective**］Karst caves, as an essential part of the Earth's Critical Zone, hold significant scientific and scenic value. However, previous studies have largely overlooked the tectonic factors influencing cave formation, and quantitative constraints on the age of cave formation remain scarce. This study aims to investigate the genesis and chronology of the Xinglong Karst Cave in the Taojiatai area of Hebei Province, elucidating the controlling factors and temporal constraints of cave development. ［**Methods**］A comprehensive investigation of cave morphology, stratigraphic attitude, and tectonic characteristics was conducted, supplemented by mineralogical analysis using X-ray diffraction and geochemical element analysis. The study analyzed the relationship between cave formation and fault activity, while the geochemical composition of red clay deposits inside the cave was compared with external weathering crusts to constrain the formation age of the cave. ［**Results**］The cave developed within Middle Proterozoic dolomitic limestone containing flint nodules, influenced by two major faults that facilitated differential dissolution along fault planes. The red clay deposits inside the cave share geochemical characteristics with external weathering crusts, indicating an exogenous origin. The enrichment of iron in red stalactites suggests leaching from surface water, further confirming the post-weathering deposition of the red clay. Regional comparisons reveal that the residual red clay outside the cave corresponds to the Tangxian planation period (3.1–3.7 Ma), indicating that the cave must have formed after this period. ［**Conclusion**］This study provides new insights into the fault-controlled genesis of the Xinglong Karst Cave and establishes a minimum formation age of 3.7 Ma, significantly younger than the Middle Proterozoic age of the host rock. The findings correct the previous misconception that the cave formed during the Proterozoic and highlight the crucial role of tectonic activity in cave development. ［**Significance**］This research enhances our understanding of the tectonic control and chronological constraints of karst cave formation, providing valuable references for the study of karst landscapes in other regions.

Keywords: karst cave; tectonics; paleosoil; geochemistry; National Geopark; Xinglong County

摘　要：岩溶洞穴作为地球关键带的重要组成部分，兼具景观和科学研究价值。已有研究对与溶洞形成密切相关的构造报道较少，对溶洞形成时代的定量分析更是缺乏。文章基于河北省兴隆县陶家台洞穴形态特征、组成洞穴的地层产状和构造的详细调查，结合沉积物矿物X射线衍射和地球化学元素分析，对

基金项目：国家自然科学基金项目（42301094）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（BLX202313）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42301094) and the Fundamental Research Fund for the Central Universities (Grant No. BLX202313).

第一作者：张皓月（1993—），女，博士，讲师，主要从事水文地质、第四纪地质研究。Email：zhanghy666@bjfu.edu.cn

通信作者：张绪教（1964—），男，博士，教授，主要从事第四纪地质与地貌研究。Email：zhangxj@cugb.edu.cn

收稿日期：2024−12−10；**修回日期：**2025−01−03；**录用日期：**2025−01−20；**网络出版日期：**2025−01−23；**责任编辑：**吴芳

兴隆溶洞成因及时代开展了研究。组成溶洞的中元古代含燧石团块白云质灰岩中发育 2 条断层，溶洞自上而下顺断层倾向发育，属断裂构造形成的差异溶蚀型溶洞。洞穴中上部灌入的红土堆积与洞外风化壳残积红土的地球化学特征基本一致，且洞穴中发育有经地表水溶滤而富铁的红色钟乳石，表明洞穴内堆积的红土来源于洞外，溶洞形成时代应在红土形成之后。通过区域对比，地表残积红土为唐县期（3.1～3.7 Ma）夷平面的产物，说明溶洞形成时代应在上新世早期。文章提出了兴隆溶洞发育受控于断层的新认识，并较好地约束了其形成时代，可为其他区域岩溶地貌的成因及时代研究提供参考。

关键词：溶洞；构造；古土壤；地球化学；国家地质公园；兴隆县

中图分类号：P642.25; P596　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)02−0278−09

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024136

0　引言

岩溶是探究地球环境演变与气候变迁的主要载体之一（Baker et al., 2007; Cheng et al., 2019），同时也具有十分重要的旅游和科普价值（史文强等，2021; Benedetto et al., 2022; Xiong et al., 2023）。我国北方发育大量以溶洞为代表的地下岩溶，因形成的动力不同，溶洞特征不尽相似。地理学研究多聚焦于溶洞内不同钟乳石的微形态特征及其成因（黄保健等，2018; 范宝祥等，2021），地质学研究则更多通过石笋反演第四纪古气候变化（马源等，2022; Nehme et al., 2024; 杨会会等，2024），而对与溶洞形成关系密切的构造却少有关注；由于缺乏可用于直接测年的物质，对溶洞形成时代的定量研究更是难点（Lipar et al., 2024）。因此，开展溶洞成因和形成时代研究，对深入理解岩溶过程和科普教育具有十分重要的理论和实践意义。

地下溶洞结构主要有水平型（平洞、层洞）、垂直型（竖洞）和复合型（Ford and Williams, 2007）。受到不同期次构造抬升的影响，在每一个地壳稳定期的潜水面附近会形成横向异质性较强的平洞（王健等，2011; 蒲俊兵，2022）；多层平洞组成层洞，这种多层次的水文地质结构反映了不同地质时期的构造抬升（吕金波等，2010）和地下水的溶蚀作用，从而为后期钟乳石的生长提供了空间；代表性水平型溶洞有北京石花洞、贵州织金洞（贺卫和李坡，2016）。垂直型溶洞一般为一整体，没有分层结构，地表水通过渗流带渗入到地下不断溶蚀可溶性岩石，形成上下联通的地下洞穴（李宝刚和高日胜，2014）；代表性垂直型溶洞有世界最深洞穴 Krubera-Voronja（Sendra and Reboleira, 2012）。

河北省承德市兴隆县陶家台地区发育有大型溶洞。洞穴内形态各异、色彩艳丽的钟乳石具有极高的景观和美学价值，是兴隆国家地质公园的主要旅游资源。兴隆溶洞发育的物质基础是距今 10～14 亿年前中元古代的碳酸盐岩类地层，是中国成洞母岩时代最老的溶洞之一（张妍，2009），但景区简介中将溶洞形成时代错写成溶洞发育地层的时代，即认为溶洞发育时代达数 10 亿年之久，是中国最古老的溶洞之一。对于兴隆溶洞的成因，张国庆等（2009）认为是节理裂隙促使降水不断溶蚀岩石，导致岩石崩落而形成的洞穴系统。然而，该溶洞的具体形成过程及时代仍缺乏足够的科学证据，有待进一步研究，以深化对地下岩溶地貌的认识，同时为科普教育和地学旅游开发提供科学支撑。

文章通过对洞穴形态特征、组成洞穴的地层产状及构造的详细调查和采样，结合矿物 X 射线衍射和土壤地球化学元素分析，开展了区域对比分析，探讨了兴隆溶洞的成因和形成时代。研究结果可加深对中国北方地下岩溶地貌成因的认识，同时为溶洞形成时代的约束提供科学的思路及方法。

1　材料与方法

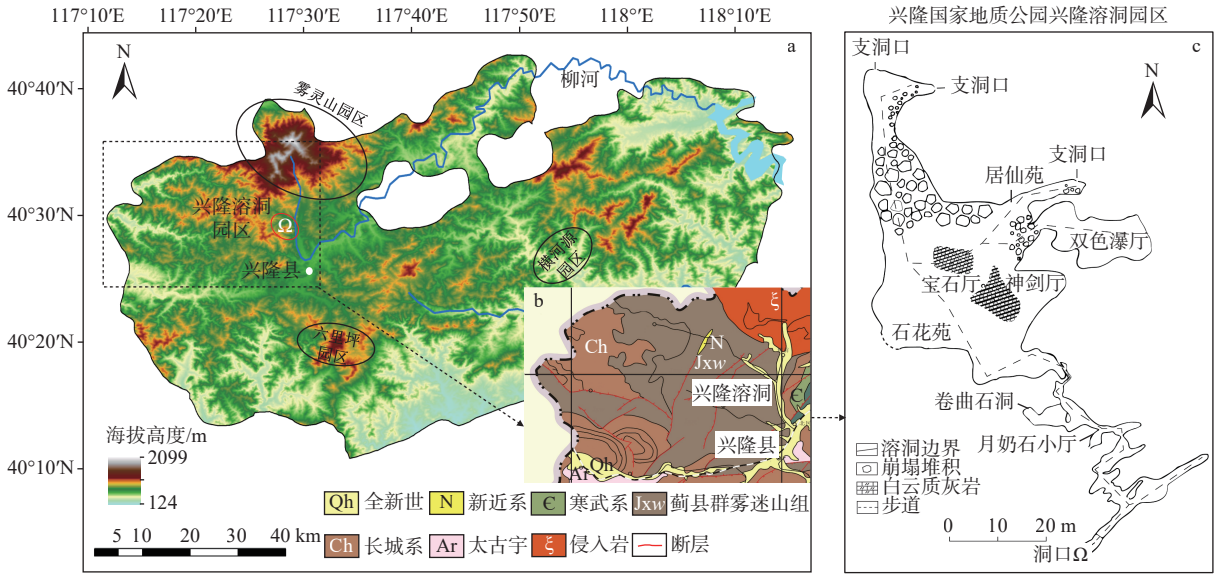
1.1　研究区概况

兴隆县地处承德市的最南部，属半湿润和半干旱的季风型大陆性气候。受北部燕山山脉和复杂山区地势的影响，兴隆四季分明、气候多变、季风性较强。迎风坡多降水，年平均降雨量约为 730 mm，主要集中在 7—8 月；年平均温度约为 7.5 ℃（孟祥普，2001）。

区内地层主要出露中上元古代石英砂岩和灰岩类沉积岩，以及燕山期侵入的花岗岩。断层构造十分发育，具有多期活动特征。中生代之前的近东西向和北东向断层构成主体构造格局，还发育有新

生代以来的北东东向和北西西向断层(崔盛芹等, 2003)。早上新世期间, 地壳稳定, 区内保留有唐县期夷平面上发育的红土风化壳, 在燕山地区的海拔为 500 m 左右(吴忱等, 2017)。

兴隆溶洞位于兴隆县北水泉乡陶家台村, 洞口坐标为 40°29′19″N、117°29′15″E, 海拔 620 m 左右, 是兴隆国家地质公园的主要园区之一(图 1)。现已开发的溶洞主洞长 180 m, 高差 72 m。与其他溶洞相比, 该溶洞较为奇特的是发育有红玉、双色瀑等多处色彩艳丽的流石类钟乳石, 为世界级地质遗迹景观(张妍, 2009); 除了具有极高的美学观赏价值外, 还有重要的科学研究意义。



a— 河北省兴隆县地形; b—研究区溶洞周边地质概况(据兴隆县 2000 年地质图编绘); c—洞穴特征

图 1 兴隆溶洞位置与洞穴平面图

Fig. 1 Location and plan of Xinglong Cave

(a) Topography of Xinglong County, Hebei Province; (b) Geological features of the area surrounding the cave (compiled from the 2000 geological map of Xinglong County); (c) Map with characteristics of the Xinglong Cave

1.2 矿物 X 射线衍射

矿物 X 射线衍射为半定量分析, 用于鉴定岩矿类型。为判断兴隆溶洞发育的地层特征, 此次研究采集了溶洞内 4 块岩石样品(图 2), 分别为燧石团块(RD-D-01)、白云岩(RD-D-02)、灰岩(RD-D-03)、钟乳石(RD-D-04), 代表不同的岩石类型。所用分析仪器型号为 D/max-2500 PC, 射线种类为 Cu(Kα), 检测依据为 SY/T 5163-2018, 送于河南省岩石矿物测试中心测试分析。

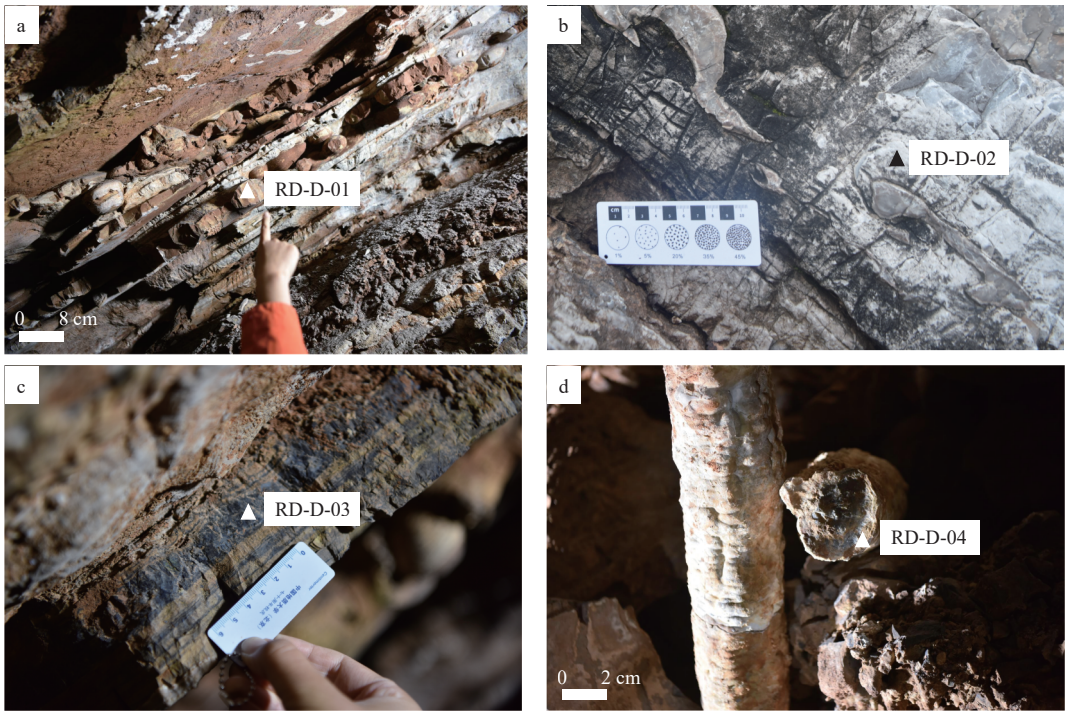
1.3 地球化学元素分析

岩石地球化学元素的含量分析可反映岩石的成分。文中采用波长色散 X 荧光光谱仪(型号: ARL AdvantXP+ / 2413), 对兴隆溶洞内外的 3 种类型红土进行取样(图 3)和主量元素测试, 用于分析判断洞内外红土是否具有同源性。其中洞内红土有 2 类, 第 1 类是灌入式的(RD-D-05), 第 2 类是在原生岩石上成层发育的(RD-D-06); 洞外红土为风化壳的残积物(RD-D-07)。样品送至中铁资源集团勘察设计有限公司检测, 检测依据参照 GB/T 14506.28-2010。

2 结果

2.1 溶洞发育特征

兴隆县陶家台地区已发现的溶洞面积大于 5000 m^2, 溶洞发育的地层为距今 10～14 亿年前的中元古代蓟县群雾迷山组, 岩性组合有燧石条带(团块)灰岩和白云质灰岩。该套地层在全县集中分布于中西部, 出露面积约为 400 km^2。溶洞内发育有形态各异的钟乳石, 按照成因可分为毛细石类、滴石类、流石类、池石类和凝结类等。这些岩溶沉积地貌的形态和大小与含碳酸盐地下水的运动特性和供水量密切相关, 例如, 毛细水作用下形成的鹅管较为细长, 而滴水沉积形成的石笋则相对粗大, 分



a— 燧石团块；b—白云岩；c—灰岩；d—钟乳石

图 2　兴隆溶洞内不同岩石的取样照片

Fig. 2　Photographs of different rocks sampled inside the Xinglong Cave

(a) Flint nodule; (b) Dolomite; (c) Limestone; (d) Stalactites



a—洞内灌入红土；b—洞内原生红土；c—洞外红土

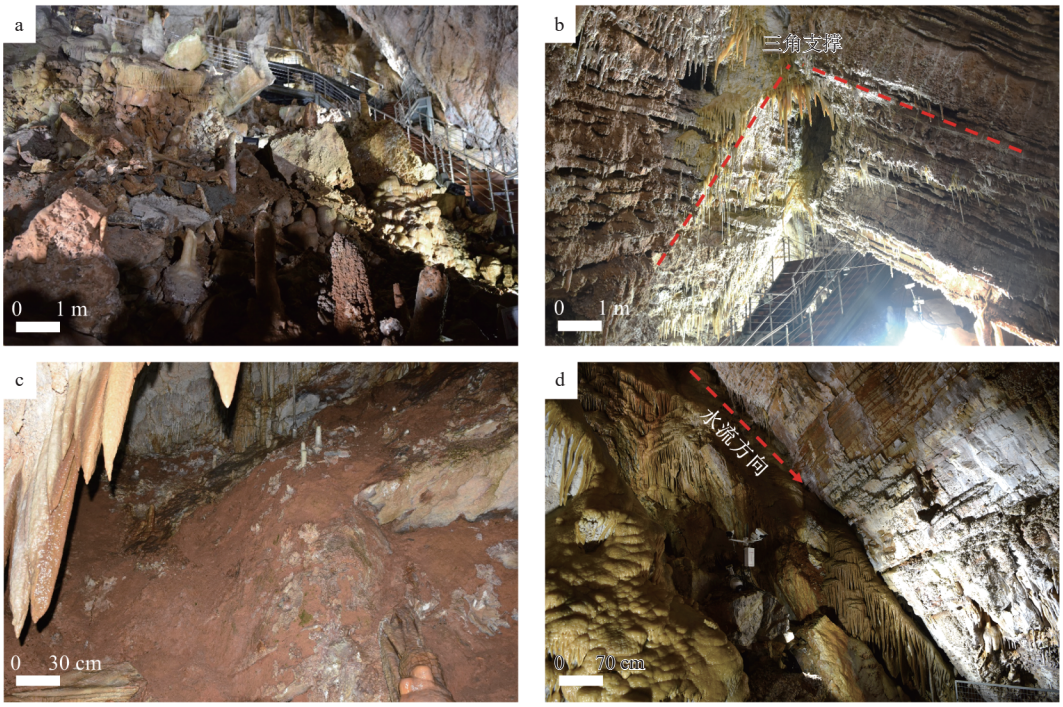
图 3　兴隆溶洞洞穴内外红土的取样照片

Fig. 3　Photographs of different red soils sampled inside and outside the Xinglong Cave

(a) Red soils poured inside the cave; (b) Native red soils inside the cave; (c) Weathering crusts outside the cave

别为毛细石类和滴石类钟乳石的典型类型。

溶洞结构与典型的顺层理发育的溶洞不同，最大的特点是呈垂直方向，与岩层交错。该溶洞并没有沿层理发育，也没有分层结构，而是贯通式的竖洞结构。溶蚀洞穴的垂直高差经激光测距仪实测为 57 m，表明溶洞的形成伴随着显著的垂直溶蚀过程和岩层的不同程度剥蚀，造成了该地区溶洞较为特殊的空间分布，具有较大的深度和规模。在洞穴大厅的中央上方，钟乳石在重力作用下曾发生多次崩塌，形成崩塌堆积（图 4a）。崩塌堆积区的存在不仅反映了洞顶部分岩石的稳定性较差，还表明了溶洞的演化过程中，重力和溶蚀的相互作用对洞内结构的影响。洞穴中央区域的崩塌作用最强，洞壁岩石构成三角形支撑，较好地保证了洞穴的稳定性（图 4b）。此外，洞穴中上部还存在多处外部灌入的红色古土壤（图 4c），往往出现在洞口附近，夹杂着棱角分明的砾石，为溶洞的成因提供了重要线索。经古土壤淋滤后的水流进一步影响了钟乳石的发育，导致其颜色偏红（图 4d），揭示了溶洞所在地区曾经历过湿热气候，土壤中铁的氧化作用对钟乳石



a—大厅中央崩塌的钟乳石；b—顶部的三角形支撑；c—灌入的红色古土壤；d—偏红色钟乳石

图 4 兴隆溶洞内部的地貌特征

Fig. 4 Geomorphological features in the Xinglong Cave

(a) Stalagmite collapsed in the center of the main hall; (b) Triangular supporting structure at the top; (c) Infilled red paleosoil; (d) Reddish stalactites

的颜色产生了显著影响。

2.2 溶洞形成条件

可溶性岩石、溶蚀性水体和水流通道是形成溶洞的必要条件。通过对兴隆溶洞进行岩石产状的测量和地球化学元素分析，可查明岩石的产出状态和可溶性特征；通过地质构造调查和测量，可判断水流通道特征。

洞内外岩石产状较为一致。洞内发育有成层较好的燧石条带灰岩，地层产状为 135°∠35°；洞外的地层产状为 130°∠35°，说明溶洞发育的物质基础为 1 套单斜地层。

溶洞内地层的岩性主要有 2 种：燧石条带（团块）灰岩和白云质灰岩。通过取样进行矿物 X 射线衍射测试，得到了不同岩石中白云石、方解石和石英等矿物的占比（表 1）。可见，形成兴隆溶洞的岩石中方解石含量为 46%，较纯灰岩（方解石>75%）低，含有大量的白云石和石英，远远达不到纯灰岩的程度，说明可溶性相对其他纯灰岩的溶洞类型较弱。此外，岩石地球化学测试分析结果显示，洞内次生的碳酸盐沉淀形成的钟乳石（TFe_2O_3：0.75%）与原岩燧石团块灰岩和白云岩（TFe_2O_3：0.09% ～ 0.36%）相比，更富铁元素。

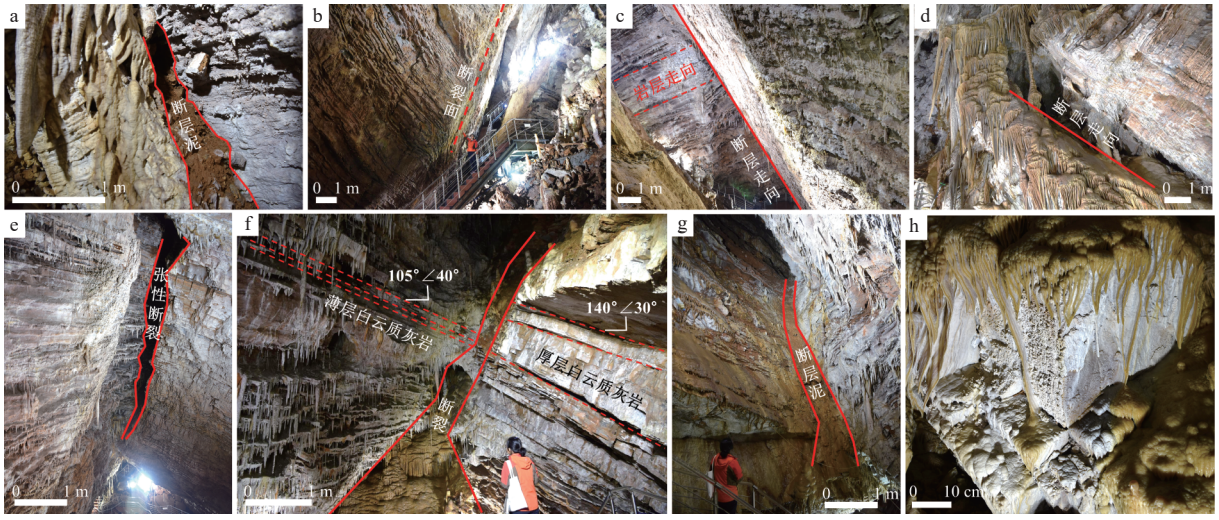
水流通道是溶洞形成的另一必要条件，深入调查溶洞内部的地质构造对探究水流通道的形成及溶洞的成因起着关键作用。调查发现，该溶洞内存在 2 条断层，产状分别为 310°∠55°和 230°∠70°，走

表 1 兴隆溶洞岩石的矿物 X 射线衍射结果（%）

Table 1 Mineral X-ray diffraction results of rocks in the Xinglong Cave (%)

采样编号	RD-D-01	RD-D-02	RD-D-03	RD-D-04
样品属性	燧石团块	白云岩	灰岩	钟乳石
方解石	2	1	46	91
白云石	4	97	19	2
石英	92	2	33	4
其他矿物	2	0	2	3

向分别为北东和北西向。第 1 条断层发育断层破碎带以及顺断裂面沉积的钟乳石(图 5a—5d)，破碎带由断层泥和断层角砾组成，与两侧完整的围岩形成了鲜明对比(图 5a)。断层面发育较为平直(图 5b)，与岩层层理走向近乎垂直(图 5c)。此外，洞内还发育多处流石类沉积(图 5d)，该类沉积与沿岩石层理发育的毛细石类和滴石类沉积不同，主要是沿断层面分布、由裂隙水形成，水流量较大，沉积规模也较大。第 2 条断层构造具有明显的张性特征以及岩层的错位现象(图 5e—5h)。张性断层自上而下贯穿整个溶洞，倾角近乎垂直(图 5e)。除了出现断层泥充填外(图 5g)，断层引起的岩层错位导致了不同盘岩层产状和同一高度岩层的厚度差异(图 5f)，其中东盘产状 140°∠30°，层厚较厚(20 ～ 30 cm)；西盘产状 105°∠40°，层厚较薄(5 ～ 10 cm)。此外，溶洞内还存在豆腐块状的岩石(图 5h)，也表明至少存在 2 条断层。相比第 1 条断层，第 2 条断层构造的断层现象更为显著，且规模较大、张开距离较宽(>10 cm)，应为溶洞的主干断层。综上，受构造运动影响，溶洞内共发育有 2 条近垂直的断层，为溶蚀作用提供了重要的水流通道，也为洞穴发育及其形态创造了条件。



a—断层破碎带；b—平直的断裂面；c—与岩层走向垂直的断裂面；d—沿断裂面发育的钟乳石；e—张性断裂；f—断层两侧的岩层厚度差异；g—高角度断层泥；h—豆腐块状岩石；a—d 为第 1 条断层；e—h 为第 2 条断层

图 5　断层发育特征

Fig. 5　Characteristics of the faults, including the first fault (a-d) and the second fault (e-h).

(a) Fault fracture zone; (b) Straight fracture surface; (c) Fracture surface perpendicular to the bedding orientation; (d) Stalactites developed along a fracture; (e) Tensional fault; (f) Thickness difference of rock layers on both sides of the fault; (g) High-angle fault gouge; (h) Blocky rock

2.3　洞穴内外的红土特征

3 个样品(洞内赭土、洞外红土、洞内红土)中主量元素的含量特征如图 6 所示。与洞穴内外风化形成的红土相比，洞内溶蚀形成的赭土(即蚀余红土)SiO_2 含量相对较低(56%)，而 Fe_2O_3(7%)、Al_2O_3(20%)、K_2O(3%)以及 MgO(4%)的含量则相对较高。洞穴内外红土的主量元素含量分布相似，SiO_2 含量占主导(约 70%)，表明两者均由富硅母质风化形成，且硅的淋失作用较弱；Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量较接近，低于洞内赭土含量，反映了相似的风化成土过程。洞穴内外红土主量元素组成的一致性，为洞内红土的母质来源提供了重要依据，即洞内红土可能是外源红土经水流搬运进入洞穴后堆积形成，而

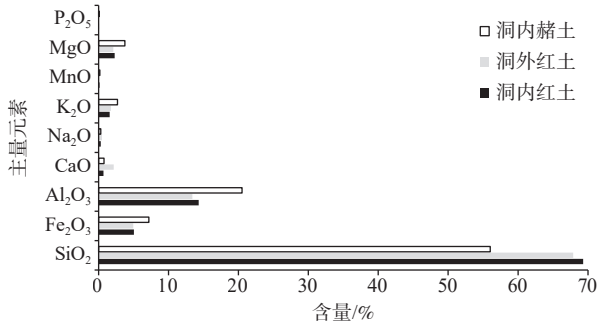


图 6　兴隆溶洞内外红土以及洞内赭土的主量元素地球化学特征

Fig. 6　Major element characteristics of red soils inside and outside Xinglong Cave and the ochre soil in the cave

非由洞穴内部灰岩类岩石的蚀余过程产生。

3 讨论

3.1 溶洞的成因分析

构造运动是溶洞形成过程中至关重要的内力。以下将从溶洞的形态结构、洞穴内地质构造特征以及形成的钟乳石特征几个方面,综合探讨兴隆溶洞的成因。

兴隆溶洞在形态上属于竖洞,主要受到垂向上地下水流的溶蚀作用,而该水流通道与区域上北东—南西和北西—南东走向的2条断层密切相关。洞穴调查表明,溶洞并没有沿可溶性岩石的层理发育,而是顺着断裂面的倾向不断向下扩展。这种垂直结构会在地下形成地质力学不稳定区,极易导致坍塌(Wei et al., 2018)。因而,从溶洞发育的形态特征,初步判定为裂隙型溶洞。

溶洞内的断层构造可验证以上推测。在区域构造运动作用下,溶洞内发育了2个方向的优势断层,多处断裂面和断层破碎带在这2个方向上具有一致的产状。由于2条断层近垂直相交,其相交角度会对交汇带处应力场分布产生明显的影响,表现为交汇带应力的显著集中(杨瑶和段东, 2016),岩石更易破碎,因而在洞内形成了钟乳石崩塌的景观。经过与区域地质图对比,兴隆溶洞内的断层可与其东侧发育的北东走向断层连接起来,应为同一条断层。溶洞的岩性以白云质灰岩(地表可见明显的刀砍纹)和含硅质(燧石团块和条带状)灰岩为主,岩石的可溶性相对南方纯灰岩较差(张绍云等, 2016; 韦跃龙等, 2020),却能形成高差如此巨大的溶洞,也间接说明了构造的关键作用(彭博等, 2020)。因为构造运动形成的断层或节理更易使岩石破碎,利于机械物理风化,即使在可溶性较差的岩石中,也能加强地下水的侵蚀和溶蚀作用(章程等, 1995; 李波等, 2024)。因此,溶洞的形成直接受断层控制,其根本驱动力来源于构造运动。

溶洞顶部钟乳石沉积形态的显著差异也进一步说明了断层的存在。由于白云质灰岩沉积较为致密,其层理中的水体滴下后往往形成滴水沉积类型的鹅管。该沉积类型通常呈现细小的管状或圆柱状形态,是由于水滴的持续沉积作用而逐渐积累的(朱学稳, 2005)。而断层的存在会增加地下水的体量和运移,在增强溶蚀性的同时,也会扩大岩溶沉积地貌的规模,形成许多流水沉积类型的石旗、石幕等大型钟乳石景观(吕金波等, 2014)。兴隆溶洞中有多处沿断裂裂隙面发育的大型次生碳酸钙沉积物,其形成主要受到断层的控制。综上认为,兴隆溶洞形成的主控因素是断层,应为构造裂隙型成因。

3.2 溶洞形成时代的约束

根据溶洞自上而下沿断层溶蚀的发育特点,溶洞上部红土是约束其形成时代的关键。以下将从溶洞内的红色堆积物为切入点,探讨红色堆积物的物源及其风化程度和形成过程,在此基础上,探讨溶洞形成时代的上限。

溶洞上部的红色堆积物物源来自外部的红色古土壤。洞穴内外2个土壤样品的地球化学测试结果显示(图6),主量元素均没有显著性差异,基本一致。并且灌入的红土与洞内灰岩溶蚀、氧化作用形成的沿层理分布、铁铝氧化物聚积的赭土存在显著差异,表明洞穴中堆积的红土来源于洞外风化的残积红土,而非洞内溶蚀作用形成的赭土。同时也说明,在溶洞发育早期,洞穴外的红土已经形成。因而在地表水流入渗过程中的溶滤作用下,洞穴外红土中的铁元素参与钟乳石的沉积,形成了溶洞顶部红色钟乳石的景观。

溶洞的形成时代至少在新生代(约65 Ma)之后,而非白云质灰岩所形成的14亿年前的中元古代。区域上既有中生代及其之前的大规模近东西向断裂构造,还存在新生代以来发育规模相对较小的北西和北东向断裂构造(崔盛芹等, 2003),断裂构造通过增强碳酸盐岩地层的渗透性和加深岩溶作用的深度,对地貌的形成起着决定性的控制作用(唐博宁等, 2020)。由于溶洞形成的主控因素是断层,这2条断层的走向(北西向和北东向)与新生代以来主要断层的走向一致。因此,可认为溶蚀开始的时间至少在断裂形成之后,即溶洞的发育时代在新生代之后,而非14亿年前。

进一步可通过灌入的红土更精确地约束溶洞的形成时代。洞穴内外红土样品的SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3含量之和占86%～89%,化学蚀变指数(CIA)在80左右,反映了这套红土的母岩经历了长时间的风化剥蚀作用,形成了风化壳古土壤,且处于红土化阶段,还未进入后期铁化阶段(张蕾, 2013),应为夷平面的产物。华北地区经历了3次主要的夷平期:北台期、甸子梁期和唐县期,分别形成于白垩纪末—古新世(93～118 Ma)、渐新世晚期(26.8 Ma)和上新世早期(3.1～3.7 Ma),对应海拔分别为2800～3000 m、1500～2200 m和400～1400 m(吴忱, 2008;

熊建国等，2020）。兴隆溶洞外部残积红土沉积的海拔在 620 m 左右，较好地对应着唐县期夷平面的海拔。因而推测为该套风化壳残积红土为华北唐县期（3.1～3.7 Ma）夷平面的产物，形成于上新世温暖、湿润的气候环境；而溶洞的形成应在此之后。通过溶洞开始发育的上限时期，间接约束了其形成时代应在上新世早期。

因此，兴隆溶洞是华北地区母岩时代最老的岩溶洞穴（张国庆等，2009），但其形成时代却在较新的上新世早期，而非旅游景区宣传的“溶洞形成于十几亿年前，是中国最古老溶洞之一”。这种观点错将溶洞所处的地层时代当成了溶洞的形成时代，也是目前不少以溶洞为旅游资源的景区解说牌中常见的低级错误，误导了大众尤其是中小学生，亟待加以纠正。

4　结论

文章从洞穴形态、组成洞穴的地层及地质构造、洞穴内外的岩石和土壤地球化学以及钟乳石的形态和颜色特征等多个角度，对兴隆溶洞地貌的成因和形成时代开展了系统调查和研究，取得了如下新认识：

（1）兴隆溶洞内发育 2 条断层，溶洞自上而下顺断层倾向发育，属于构造裂隙形成的差异溶蚀型溶洞，反映了溶洞的发育不仅受到溶蚀作用的影响，还与区域构造活动密切相关。

（2）华北唐县期夷平面风化壳残积红土的时代较好地约束了溶洞开始发育的上限时代，即至少 3.7 Ma 的上新世早期，而非园区简介中所写的 14 亿年前岩石形成的中元古代。这一发现有助于修正此前对于溶洞发育时代的认知，为理解该地区的岩溶演化历史提供了新的时间框架。

References

BAKER A, ASRAT A, FAIRCHILD I J, et al., 2007. Analysis of the climate signal contained within $\delta^{18}O$ and growth rate parameters in two Ethiopian stalagmites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 71(12): 2975-2988.

BENEDETTO G, MADAU F A, CARZEDDA M, et al., 2022. Social economic benefits of an underground heritage: measuring willingness to pay for Karst caves in Italy[J]. Geoheritage, 14(2): 69.

CHENG H, ZHANG H W, ZHAO J Y, et al., 2019. Chinese stalagmite paleoclimate researches: a review and perspective[J]. Science China Earth Sciences, 62(10): 1489-1513.

CUI S Q, WU Z H, MA Y S, et al., 2003. Meso-Cenozoic intracontinental orogenic process in the Beijing area: a case study based on geological observations from the Ming Tombs to Badaling Mountain[J]. Journal of Geomechanics, 9(3): 201-219. (in Chinese with English abstract)

FAN B X, ZHOU Z F, AN D, et al., 2021. The evolution process of atypical stalactites in Mahuang Cave, Suiyang County, Guizhou Province[J]. Quaternary Sciences, 41(6): 1565-1573. (in Chinese with English abstract)

FORD D, WILLIAMS P, 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology[M]. Chichester, UK: John Wiley and Sons, Inc.

HE W, LI P, 2016. Evolution feature and scientific values of Zhijin cave[J]. Guizhou Science, 34(2): 31-36. (in Chinese with English abstract)

WEI Y Y, SUN S L, HUANG J J, et al., 2018. A study on karst development characteristics and key control factors of collapse in Xuzhou, eastern China[J]. Carbonates and Evaporites, 33(3): 359-373.

HUANG B J, LI L L, LI C Z, et al., 2018. Feature of cave cloud and its origin in Jingua cave, Guizhou, China[J]. China Mining Magazine, 27(S2): 300-303. (in Chinese with English abstract)

LI B, YU D L, WANG N, et al., 2024. Karst groundwater enrichment law in Laiwu Basin[J]. Journal of Geomechanics, 30(4): 691-702. (in Chinese with English abstract)

LI B G, GAO R S, 2014. Characteristics and main controlling factors of karst caves in the southern margin of Kepingtage tectonic belt, Tarim Basin[J]. Geoscience, 28(1): 149-155. (in Chinese with English abstract)

LIPAR M, BARHAM M, DANIŠÍK M, et al., 2024. Ironing out complexities in karst chronology: (U-Th)/He ferricrete ages reveal wet MIS 5c[J]. Science Advances, 10(40): eadp0414.

LÜ J B, LU Y R, ZHENG G S, et al., 2010. Formation of karst cave system and relationship with neotectonic movement in Beijing Western Hills, Bejing, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(4): 502-509. (in Chinese with English abstract)

LÜ J B, LI T Y, ZHENG M C, et al., 2014. Progress of karst study in Beijing Shihua Cave[J]. Urban Geology, 9(2): 11-17. (in Chinese with English abstract)

MA Y, YIN J J, YUAN D X, 2022. Research progress on response of elements and their ratios in cave drip water and speleothems to climate and environmental change[J]. Geological Review, 68(5): 1897-1911. (in Chinese with English abstract)

MENG X P, 2001. Vertical distribution of vegetation in Wuling Mountain[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology(1): 41-42. (in Chinese)

NEHME C, VERHEYDEN S, KLUGE T, et al., 2024. Climate variability in the northern levant from the highly resolved Qadisha record (Lebanon) during the Holocene optimum[J]. Quaternary Research, 118: 180-194.

PENG B, ZHANG H, YANG S H, et al., 2020. Logging characterization of Carboniferous fractured-vuggy karst reservoirs in the eastern Qaidam Basin[J]. Journal of Geomechanics, 26(6): 923-931. (in Chinese with English abstract)

PU J B, 2022. Earth's critical zone and karst critical zone: structure, characteristic and bottom boundary[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 41(5): 230-241. (in Chinese with English abstract)

SENDRA A, REBOLEIRA S P, 2012. The world's deepest subterranean community—Krubera-Voronja Cave (Western Caucasus)[J]. International Journal of Speleology, 41(2): 221-230

SHI W Q, LIAO R S, LI C Z, et al., 2021. The karst characteristics and cultur-

al transmission: Xiaya geological cultural village, Fengshan, Guangxi[J]. China Mining Magazine, 30(S1): 479-481. (in Chinese with English abstract)

TANG B N, ZHU C Q, QIU N S, et al., 2020. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2002-2012. (in Chinese with English abstract)

WANG J, CHEN Z, ZHANG M P, et al., 2011. The genetic sorts of the typical karst caves in Tianguishan, Hebei Province[J]. Mountain Research, 29(2): 188-194. (in Chinese with English abstract)

WEI Y L, JIANG Z C, CHEN W H, et al., 2020. An analysis of characteristics, formation and evolution of the karst landforms, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(4): 561-574. (in Chinese with English abstract)

WU C, 2008. Landform environment and its formation in North China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

WU C, ZHANG X Q, WANG R, et al. , 2017. The planarization surface of mountainous areas in North China[J]. Geography and Geo-Information Science, 33(1): 124-126. (in Chinese)

XIONG J G, LI Y L, ZHANG P Z, 2020. New advances in planation surface research[J]. Advances in Earth Science, 35(4): 378-388. (in Chinese with English abstract)

XIONG K N, ZHANG S R, FEI G Y, et al., 2023. Conservation and sustainable tourism development of the natural world heritage site based on aesthetic value identification: a case study of the Libo Karst[J]. Forests, 14(4): 755.

YANG H H, ZHOU Y M, ZHONG Y, et al., 2024. Variations and mechanisms of the Asian summer monsoon revealed by stalagmite $\delta^{18}O$ records[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 44(1): 143-155. (in Chinese with English abstract)

YANG Y, DUAN D, 2016. Influencing factors analysis of the ground stress distribution regularity of X-pattern normal fault[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 12(6): 1485-1490. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C, JIANG Z C, XIE Y Q, et al., 1995. Geological structure, neotectonic movement and the formation, evolution of regional karst geomorphology of West-Hill, Beijing[J]. Carsologica Sinica, 14(3): 231-240. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G Q, HE Q M, TIAN M Z, et al., 2009. Types, genesis and values of geological heritages in Xinglong County[J]. Resources & Industries, 11(2): 41-45. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L, 2013. Stratiform geomorphology' development and significance of neotectonic movement in Wangmangling, Lingchuan, Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

ZHANG S Y, ZHOU Z F, XIONG K N, et al., 2016. Spatial pattern of the caves in Guizhou Province and their the influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica, 71(11): 1998-2009. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y, 2009. The type of geoheritages and comprehensive evaluation in Xinglong Geopark, Hebei[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

ZHU X W, 2005. The classification scheme of speleothems[J]. Carsologica Sinica, 24(3): 169-174. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

崔盛芹, 吴珍汉, 马寅生, 等, 2003. 北京地区中新生代陆内造山过程: 以十三陵—龙庆峡—八达岭路线观察为基础[J]. 地质力学学报, 9(3): 201-219.

范宝祥, 周忠发, 安丹, 等, 2021. 贵州绥阳麻黄洞非典型钟乳石的演化过程[J]. 第四纪研究, 41(6): 1565-1573.

贺卫, 李坡, 2016. 织金洞发育特征及其科学价值[J]. 贵州科学, 34(2): 31-36.

黄保健, 李乐乐, 李成展, 等, 2018. 贵州金瓜洞云朵石的特征及成因初探[J]. 中国矿业, 27(S2): 300-303.

李宝刚, 高日胜, 2014. 塔里木盆地柯坪塔格构造带南缘古溶洞特征及主控因素分析[J]. 现代地质, 28(1): 149-155.

李波, 于大潞, 王楠, 等, 2024. 莱芜盆地岩溶地下水富集规律[J]. 地质力学学报, 30(4): 691-702.

吕金波, 卢耀如, 郑桂森, 等, 2010. 北京西山岩溶洞系的形成及其与新构造运动的关系[J]. 地质通报, 29(4): 502-509.

吕金波, 李铁英, 郑明存, 等, 2014. 北京石花洞岩溶学研究进展[J]. 城市地质, 9(2): 11-17.

马源, 殷建军, 袁道先, 2022. 洞穴滴水、石笋中元素及元素比值对气候环境变化响应的研究进展[J]. 地质论评, 68(5): 1897-1911.

孟祥普, 2001. 雾灵山植被垂直分布状况[J]. 河北林业科技(1): 41-42.

彭博, 张浩, 杨晟颢, 等, 2020. 柴达木盆地东部石炭系古岩溶缝洞单元测井响应[J]. 地质力学学报, 26(6): 923-931.

蒲俊兵, 2022. 地球关键带与岩溶关键带: 结构、特征、底界[J]. 地质科技通报, 41(5): 230-241.

史文强, 廖如松, 李成展, 等, 2021. 岩溶特色, 文化传承: 广西凤山下牙地质文化村[J]. 中国矿业, 30(S1): 479-481.

唐博宁, 朱传庆, 邱楠生, 等, 2020. 雄安新区雾迷山组岩溶裂隙发育特征[J]. 地质学报, 94(7): 2002-2012.

王健, 陈琢, 张梅平, 等, 2011. 河北省天桂山典型溶洞景观成因类型[J]. 山地学报, 29(2): 188-194.

韦跃龙, 蒋忠诚, 陈伟海, 等, 2020. 山东岩溶地貌特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 41(4): 561-574.

吴忱, 2008. 华北地貌环境及其形成演化[M]. 北京: 科学出版社.

吴忱, 张秀清, 王然, 等, 2017. 华北山地夷平面研究[J]. 地理与地理信息科学, 33(1): 124-126.

熊建国, 李有利, 张培震, 2020. 夷平面研究新进展[J]. 地球科学进展, 35(4): 378-388.

杨会会, 周祐民, 仲义, 等, 2024. 石笋$\delta^{18}O$揭示的亚洲夏季风变化及机制综述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 44(1): 143-155.

杨瑶, 段东, 2016. X型正断层地应力分布规律影响因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 12(6): 1485-1490.

章程, 蒋忠诚, 谢运球, 等, 1995. 北京西山南部构造及新构造运动与区域岩溶地貌形成、演化[J]. 中国岩溶, 14(3): 231-240.

张国庆, 贺秋梅, 田明中, 等, 2009. 河北兴隆地质遗迹类型、成因及其价值评价[J]. 资源与产业, 11(2): 41-45.

张蕾, 2013. 山西陵川王莽岭地区层状地貌的发育及其新构造运动意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

张绍云, 周忠发, 熊康宁, 等, 2016. 贵州洞穴空间格局及影响因素分析[J]. 地理学报, 71(11): 1998-2009.

张妍, 2009. 河北兴隆地质公园地质遗迹类型及其综合评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

朱学稳, 2005. 洞穴钟乳石类的分类方案[J]. 中国岩溶, 24(3): 169-174.