

贵安直管区岩溶管道主要发育期次：来自沉积与构造演化的证据

赵磊*, 安亚运#, 盘应娟, 杨璐, 刘汉林, 曾禹人, 张德明

贵州省地质调查院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2023年11月13日; 录用日期: 2024年1月2日; 发布日期: 2024年1月10日

摘要

贵安直管区内岩溶发育, 但对岩溶的发育过程认识尚不清楚。本文通过区域地层分布及特征对比, 结合构造演化史综合分析, 重塑了贵安直管区的沉积-构造动态演化过程, 并以此限定了岩溶发育的主要时段。提出区内岩溶的形成过程主要分为3个期次: 第一期形成于晚三叠世-早侏罗世(~230~200 Ma), 第二期形成于早白垩世(~145~100 Ma), 第三期为新生代以来(~66 Ma), 其中第三期是区内岩溶管道发育的高峰时期, 特别是2.58 Ma以来的多期构造升降形成不同海拔标高内典型岩溶管道分布。该研究对直管区岩溶的形成与演化进行了精细刻画和时间标定, 一定程度上提升了岩溶研究的程度, 为后续开展城市地下空间利用提供了详细的地质依据。

关键词

岩溶管道, 发育期次, 沉积-构造作用, 地下空间利用, 贵安直管区

Main Development Stages of Karst Pipelines in Gui'an Direct Territory: Evidence from Sedimentary and Tectonic Evolution

Lei Zhao*, Yayun An#, Yingjuan Pan, Lu Yang, Hanlin Liu, Yuren Zeng, Deming Zhang

Guizhou Geological Survey, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 13th, 2023; accepted: Jan. 2nd, 2024; published: Jan. 10th, 2024

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 赵磊, 安亚运, 盘应娟, 杨璐, 刘汉林, 曾禹人, 张德明. 贵安直管区岩溶管道主要发育期次: 来自沉积与构造演化的证据[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(1): 1-11. DOI: 10.12677/ag.2024.141001

Abstract

Karst is widely developed in Gui'an direct territory, but the process is not well understood. Based on the correlation of regional stratigraphic distribution and characteristics, combined with the comprehensive analysis of structural evolution history, this paper reshaped the sedimentation-tectonic dynamic evolution process in Gui'an direct territory, and thus defined the main period of karst development. It is suggested that the karst formation process in this area can be divided into three stages: the first stage was formed in the Late Triassic to Early Jurassic (~230~200 Ma), the second stage was formed in the Early Cretaceous (~145~100 Ma), and the third stage was formed since the Cenozoic (~66 Ma). The third stage, especially since 2.58 Ma, was the peak period of karst pipeline development in the area, and the distribution of typical karst pipeline in different elevations was formed by multiple tectonic elevations. This study has carried out a fine characterization and time calibration of the formation and evolution of karst in the direct territory, which has improved the degree of karst research to a certain extent, and provided a detailed geological basis for the future utilization of urban underground space.

Keywords

Karst Pipeline, Developmental Stage, Sedimentation-Tectonic Process, Underground Space Utilization, Gui'an Direct Territory

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为全球三大连片岩溶发育区之一，我国西南地区的岩溶分布广泛且强烈。建立在岩溶发育核心地区的黔中城市群，长期以来在岩溶作用和人类活动的共同影响下，越来越多的城市地质问题暴露出来。以贵阳市区为例，中心城区发生岩溶塌陷、地面沉降等[1]，轨道交通在施工建设过程中遇到突水突泥、地面塌陷和隐伏岩溶等[2] [3] [4]。由此可见，岩溶的发育作为一种不良地质作用，在很大程度上制约了地区城市规划和工程建设。

前人对贵安直管区及周边地区水工环方面的研究主要集中在地下水动态[5] [6]、水化学及水质变化[7] [8]、地下水污染及防治[9]-[14]等方面，缺乏对岩溶地貌的发育与演化相关的系统研究。本文根据野外系统调查结果，结合区域地层分布、岩相组合、接触关系以及区域构造演化综合分析，对直管区自三叠纪以来的沉积 - 构造演化历史进行过程重塑，并以国际地层年代表为参考进行时间标定。在此基础上，将直管区内岩溶形成过程划分为 3 个主要期次。

2. 区域地质概况

贵安直管区地处黔中高原腹地，位于贵阳、安顺两市结合部，大地构造位置属于扬子陆块江南复合造山带黔南拗陷都匀南北向隔槽式褶皱变形区(见图 1(a)) [15]。直管区地表主要发育近 SN 和 NE 两组断裂构造(见图 1(b))。其中，近 SN 向断层以马场逆断层为代表，该组断层破碎带常形成构造角砾岩，时见弱硅化和牵引褶皱发育；NE 向断层以打桶寨断层较为典型，该组断层兼具逆冲和左行走滑特征，局部切割了近 SN 向断层，指示该组断层形成时代较晚。区内褶皱构造发育，以直管区中部的中八复式向斜和

小河向斜最为明显。其中，中八复式向斜核部地层为中上三叠统，两翼地层产状平缓，整体形成宽缓褶皱；小河向斜核部地层为中侏罗统，褶皱轴整体呈南北向，与区内早期断裂走向基本一致。

直管区周边主要出露泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系[15]。其中，泥盆系、石炭系整体为海相沉积，在直管区南部马岭一带有少量出露；二叠系主要出露中上二叠统，其分布大致沿清镇-马场-凯佐一线为界，西部主要出露上二叠统碎屑岩地层，东部则出露中上二叠统碳酸盐岩地层。自西向东，晚二叠世地层整体显示由海陆交互相向开阔台地相过渡的沉积分异格局。三叠系是直管区分布最为广泛且最具特色的地层，赋存于中三叠统的多条相变带，指示同期盆地沉积存在明显的沉积分异。地层层序显示自早三叠世-中三叠世为连续海相沉积，岩性以碳酸盐岩为主，夹少量碎屑岩，广泛分布的碳酸盐岩为后期岩溶的形成和发育奠定了良好的物质基础(见图 1(c))。区内经过长期的地表风化和地下水溶蚀改造，形成现今明显的喀斯特地貌特征。侏罗系主要分布于小河向斜，在清镇、平坝也有少量分布，主体为一套河流相-湖湘沉积；白垩系主体为一套河流相地层，在直管区周缘零星出露。

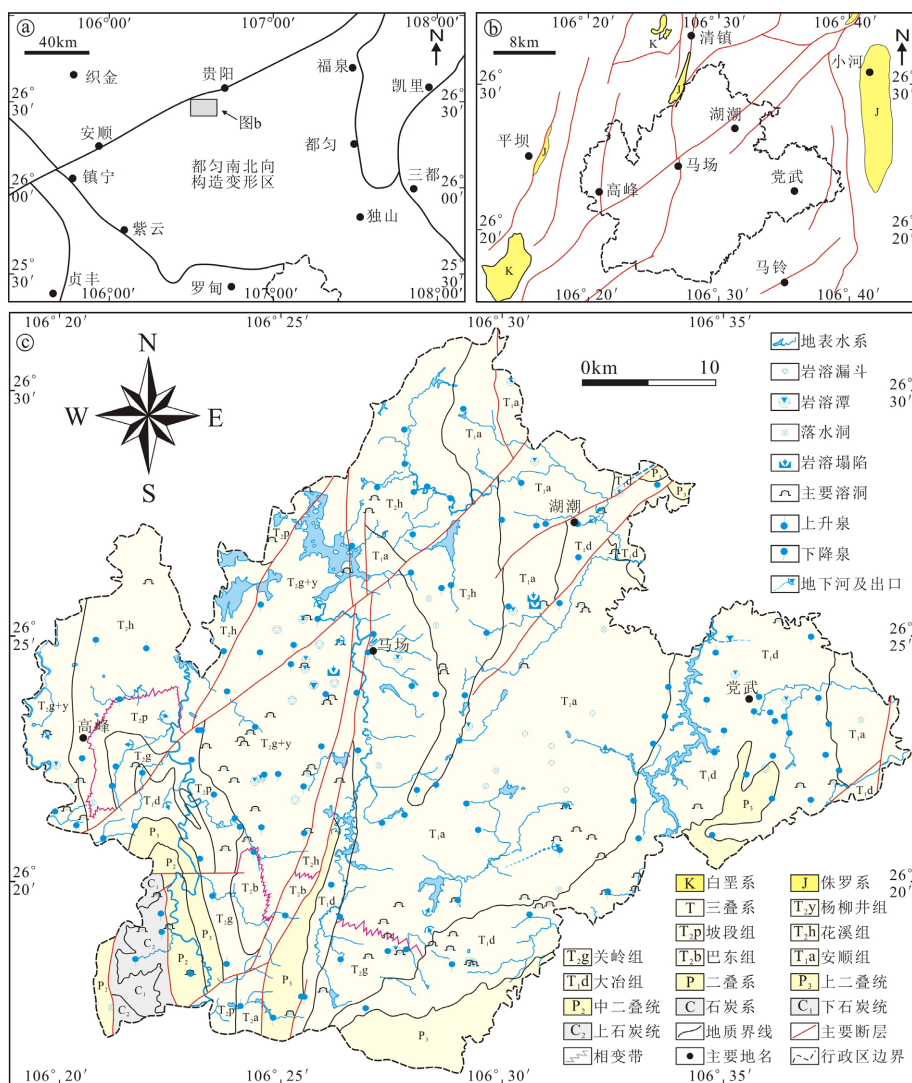


Figure 1. Geotectonic location map (a), regional structural map (b), and hydrogeological map (c) of Gui'an direct territory

图 1. 贵安直管区大地构造位置示意图(a)、区域构造简图(b)以及水文地质图(c)

3. 典型岩溶个体特征及分布

通过系统野外调研,基本查明了直管区内典型岩溶的特征及分布规律。区内主要发育溶洞、岩溶塌陷、岩溶潭、泉点、地下河、岩溶漏斗等多种岩溶个体类型(见图2)。其中,溶洞主要分布于直管区中部、南部,受地形起伏控制较为明显。主体以干枯溶洞为主,指示位于包气带内,局部可见双层甚至多层溶洞发育,钟乳石发育较为普遍。洞口附近走向延伸较为平坦,延伸20~2300 m不等。对区内主要溶洞的洞口标高进行统计[16],显示主体分布于1190~1495 m高程范围,在1300~1325 m、1425~1475 m高程范围出现频繁(见图3(a))。岩溶潭集中分布于高峰山地区地形低洼地带,地层主要为中三叠世关岭组、杨柳井组。岩溶潭的出现,大致代表了局部地区的地下水水位。区内地下河主要分布在地形变化较大的陡坡地带,部分地下河进出口配对明确,在直管区范围延伸3~6 km,是区内地下水赋存和排泄的主要通道。



Figure 2. Photos of typical karst pipe outcrop in Gui'an direct territory: (a) The Sizishan cave in Longbao village; (b) The Jinzhong cave in Laopang village; (c) The karst pool in Lanba village; (d) The karst depression in Laopang village; (e) The karst in Guangxing village; (f) The karst spring in Limu village

图2. 贵安直管区典型岩溶露头照片: (a) 龙宝村狮子山洞; (b) 老胖村金钟洞; (c) 滥坝村岩溶潭; (d) 老胖村岩溶洼地; (e) 广兴村岩溶塌陷; (f) 栗木村泉点

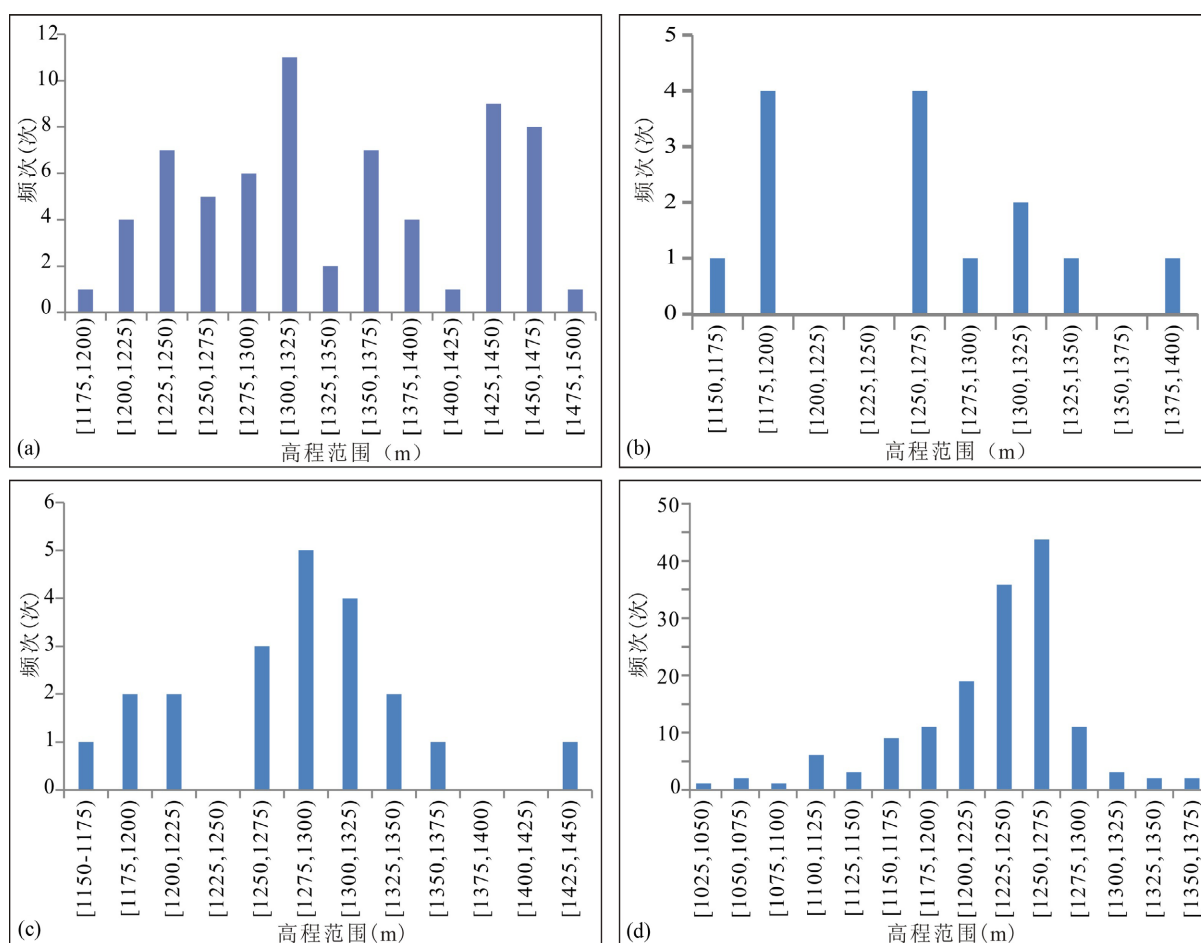


Figure 3. Statistics of frequency of different elevations of karst cave (a), underground river (b), karst funnel and collapse (c), and descending spring (d) in Gui'an direct territory

图 3. 贵安直管区溶洞(a)、地下河(b)、岩溶漏斗与塌陷(c)、下降泉(d)不同高程频次统计图

统计显示[16], 主要位于 1175~1200 m、1250~1275 m 高程范围(见图 3(b))。岩溶漏斗主要分布在中部地区, 位于中三叠世关岭组、杨柳井组分布区, 以干枯漏斗为主, 低洼处也可见有少量充水漏斗; 落水洞主要分布在中部安顺组地层分布区, 其余地层中少见; 岩溶塌陷在地表呈串珠状分布, 平面分布显示与区域断层密切相关, 其发育可能主要受断层构造的控制。统计显示[16], 区内岩溶漏斗、落水洞、岩溶塌陷主要位于 1250~1325 m 高程范围(见图 3(c))。泉点的分布在地形略起伏地区较为集中, 以下降泉为主, 在地形略起伏地区分布相对集中。通过对下降泉标高的系统统计, 结果显示, 区内下降泉主要分布于 1047~1370 m 高程范围, 尤其在 1225~1275 m 高程范围最为集中, 整体显示不规则正态分布特点(见图 3(d))。

通过对直管区包气带内典型岩溶个体的赋存标高进行系统统计, 结果显示(见表 1), 从集中分布高程范围来看, 岩溶漏斗/岩溶塌陷 > 下降泉 > 地下河。根据岩溶发育的一般规律, 岩溶漏斗为连接天水与地下水的通道, 其下端多与岩溶管道相连; 下降泉为天水汇聚后, 从地下排泄的通道; 而地下河为地下水沿岩溶管道排泄的主要通道。典型岩溶个体集中分布高程范围整体呈逐渐降低的趋势, 这与岩溶发育和演化的规律大致吻合。而溶洞的分布与其他典型岩溶个体集中出露高程范围无明显关联, 间接指示区内溶洞的发育具有阶段性、多期次发育的特征。

4. 沉积演化对岩溶发育时限的启示

地层作为沉积作用形成的产物，详细记录并见证了沉积环境变迁的过程。通过对区域地层分布、沉积环境的详细分析，可以为岩溶发育过程提供确凿的地层证据。直管区地表大面积分布三叠系，尤其以早、中三叠世地层为主，岩性为灰岩、白云岩以及二者的过渡类型，广泛分布的可溶性岩类为后期岩溶的形成与演化奠定了物质基础。

Table 1. Statistical table of elevation of typical karst individual in Gui'an direct territory

表 1. 贵安直管区典型岩溶个体标高统计表

岩溶个体类型	调查统计个数(个)	分布高程范围(m)	集中分布高程范围(m)
漏斗/塌陷	24	1166~1448	1250~1325
下降泉	150	1047~1370	1225~1275
地下河	14	1170~1395	1175~1200; 1250~1275
溶洞	67	1190~1495	1300~1325; 1425~1475

4.1. 三叠纪

直管区地表出露范围最广地层为三叠系，主要包括早三叠世大冶组、安顺组；中三叠世花溪组、坡段组、巴东组、关岭组、杨柳井组等岩石地层单元，早、中三叠世为沉积连续，整体以海相碳酸盐岩沉积为主，局部夹有少量碎屑岩地层。区域地质资料显示，碳酸盐岩分布区最初的沉积分异自早三叠世中期就已经开始显现，形成局限台地-台缘丘-台缘斜坡-盆地的古沉积格局和较完整的相变带沉积序列。中三叠世，随着生物作用的加剧，台缘隆起更加明显，形成了典型的台缘滩，而由台缘滩组成障壁，靠陆一侧围限形成局限台地。从中三叠世中早期至晚三叠世早期，海水逐渐退缩，出现了分布广泛的局限台地相碳酸盐沉积。上述沉积演化过程是造就区内中三叠世多相变带的原因。

晚三叠世是区内沉积环境由海向陆演化的重要发展阶段。尽管直管区内未见有上三叠统出露，但在直管区周缘，如东侧花溪、三桥、都拉营一带以及西侧清镇高铺、平坝一带，均有上三叠统分布，主要有晚三叠世改茶组、三桥组，以及时代为晚三叠世-早侏罗世的二桥组。其中，改茶组整体为一套局限台地相沉积，时代为拉丁期至卡尼期。在二桥一带，该组与下伏杨柳井组整合接触，二者为连续沉积。三桥组代表贵阳地区卡尼期滨岸陆源碎屑滩相砂页岩及灰岩沉积地层，分布于贵阳花溪、三桥、清镇高铺、后午及平坝城郊一带，底部呈假整合覆于改茶组之上，顶部被二桥组假整合覆盖；二桥组为晚三叠世诺利期-早侏罗世赫塘期的一套河湖相砂岩夹粘土岩地层，与上覆、下伏地层均呈假整合接触。

地层的接触关系指示，自早三叠世以来，直管区内均为连续的海相沉积，并一直持续到晚三叠世卡尼期。在改茶组沉积之后，区域上经历了一次构造隆升，由地壳的垂向升降形成晚三叠世改茶组与三桥组之间的假整合接触。在三桥组沉积之后，又一次的构造隆升事件启动，这一期的构造隆升导致区内沉积环境发生了由海相向陆相的转变。而在二桥组沉积之后，区域上再次发生构造隆升，造成二桥组与下侏罗统之间的假整合。

4.2. 侏罗纪

区域上，侏罗系主要分布在贞丰-贵阳-遵义一线以西地区[15]。从现今的地层残留记录看，北部地区地层记录完整性更好，主体为大型内陆拗陷盆地，出现了较复杂的河湖相沉积。贵州北部赤水-习水一带地层层序齐全，至今还保留了下、中、上统；而在贵阳-清镇一带，则只保留了中-下侏罗统，而

缺失了上侏罗统露头。如分别位于贵安直管区东西部的贵阳小河、清镇地区，中-下侏罗统地层自下而上分为自流井组和沙溪庙组，其上均剥蚀未见顶。

贵阳-清镇一带在早、中侏罗世为连续沉积，但在晚侏罗世是处于剥蚀区还是处于沉积区，只是沉积后被剥蚀未得到保留？区域资料显示，中侏罗世沙溪庙组分为上下两个岩性段，其中下段代表了干旱炎热气候条件下的曲流河-洪泛平原沉积，晚期转为浅-深水湖泊相沉积；上段整体代表了曲流河-洪泛平原沉积，局部为湖相或牛轭湖沉积。赤水-习水一带晚侏罗世地层自下而上分为遂宁组和蓬莱镇组，其中遂宁组为一套曲流河-洪泛平原沉积，且以后者为主；其上蓬莱镇组为曲流河-辫状河沉积，局部为牛轭湖沼泽沉积。对比分析认为，赤水-习水一带中侏罗世与晚侏罗世沉积环境接近，显示出沉积作用的连续性，暗示中-晚侏罗世之交并无强烈的构造活动，地形地貌以及沉积作用均具有继承性特征，整体处于伸展构造背景。综合分析认为，贵阳-清镇一带在早侏罗世-晚侏罗世整体应为连续沉积，直管区内无上侏罗统出露的主要原因是后期剥蚀导致。

4.3. 晚白垩世

在平坝-贵阳一带发育上白垩统河流相地层茅台组，该套地层与下伏地层为角度不整合接触关系。砾岩中多见来自二叠系、三叠系的灰岩、白云岩及硅质岩砾石[17]，整体显示出近源搬运后再沉积的特点。

在直管区周缘，可见茅台组呈角度不整合覆于中上三叠统、二叠系以及石炭系之上，指示该组沉积之前，区域上至少经历了一次强烈的构造挤压。根据前述分析结果，结合晚白垩世地层的分布特征综合分析，认为在侏罗纪与晚白垩世沉积环境并没有较大的改变，先期构造挤压对直管区一带地形地貌的改造作用极其有限，区内整体应处于区域沉积基准面附近。

4.4. 始新世晚期~渐新世早期

区域上，在贵州盘县一带零星分布石脑组，整体为山麓冲洪积相沉积，化石指示其时代为始新世晚期~渐新世早期。该组与下伏中三叠统呈角度不整合接触，其上剥蚀未见顶。

尽管石脑组分布局限，但该组具有典型山前磨拉石建造特征，指示在该组沉积之前经历了一期或多期强烈的构造隆升，沉积期区域构造活动较为微弱。

5. 构造演化对岩溶发育时限的启示

在构造隆升阶段，早期的岩溶剥夷面被抬升到一定高度而具有新的势能，侵蚀基准面相应下降，水流对碳酸盐岩的溶蚀作用以侵蚀切割为主，岩溶作用以垂向发育为主。而在构造活动轻微、地壳相对稳定的阶段，岩溶演化则以水平作用为主，地表水流以剥蚀夷平作用为主，在产生新岩溶剥夷面的同时，形成较成熟的岩溶形态组合。因此，构造作用对岩溶作用的主要控制体现在断裂-褶皱形成、势能的升降、地表风化剥蚀消减载荷以及与侵蚀基准面升降的动态关系中。从直管区地层分布看，岩溶主要赋存于下三叠统和中三叠统。根据前节分析结果显示，区内从早三叠世到晚三叠世卡尼期均为连续的海相沉积。对晚三叠世以来构造演化史的系统分析，可以为解析区内岩溶作用发生和发展提供依据。

5.1. 安源运动

受太平洋板块对亚洲大陆北西向斜向俯冲作用远程效应的影响，在晚三叠世晚期发生一期构造活动，贵州地质界称之为安源运动[15][18]。该期活动以构造隆升为主，相当于广义印支运动最强的一幕。区域上，主要表现为上三叠统顶部层位的缺失，形成二桥组与下伏三桥组之间假整合接触关系。

区域对比认为，安源运动所导致的地壳垂向升降可能对包含直管区在内的贵州西部地区地形地貌具

有较强的改造作用，以至于原盆地大部地区在晚三叠世并没有形成地层的持续沉积。中三叠世以来，因台地边缘隆起造就的台盆分异格局、地形地貌差异被这一期构造隆升事件逐渐抹平，由此导致贵州大陆从此结束了海相沉积历史。

5.2. 燕山运动

尽管该期构造运动命名于北京西山[19]，但却是对贵州地区影响最大的一次构造运动，不仅导致区域上早白垩世之前的地层普遍发生褶皱和变形，并由此奠定了现今主要地质构造面貌基础，还使贵州从此进入了板内造山演化阶段。对于该期构造活动的时限，各研究者尚存在不同的意见和认识[20] [21] [22]。就贵州而言，角度不整合存在于上白垩统与下覆地层之间，邻区湘南-湘中一带则位于中侏罗统与上覆地层之间，由此限定了燕山运动的大体时间范围。

5.3. 喜山运动

发生在渐新世以来的喜山运动，受控于太平洋板块俯冲及印度和亚洲大陆的碰撞，造成区内近东西向挤压的构造环境。其中，始新世与渐新世之交，贵州北部与四川盆地相连的大型湖盆结束沉积，挤压形成褶皱并逐渐隆升。其余大部分地区自渐新世以来，以大面积差异性、间歇性隆升为特征，整体形成高原地貌，高原面上又先后形成一些小型断陷谷地[23]。受燕山期构造挤压形成的褶皱地层，在该期再次挤压变形，并进一步隆升接受剥蚀。

直管区控制现今构造形态的近南北向断裂、褶皱组合即为喜山期东西向构造挤压的产物。区域上，前人将包含直管区范围在内由数条边界断层围限的三角形区域划分为长顺南北向构造带。该构造带内，地表浅部构造线方向以近南北向为主，褶皱的形态受边界断层限制，形成褶皱轴与边界断层走向一致的典型构造行迹特征。

5.4. 新构造运动

新近纪以来的新构造运动，明显具有掀斜性、间歇性和差异性隆升等特征[24] [25]。综合分析认为，控制直管区内岩溶塌陷分布的北东向断裂组就是该期构造活动的产物。直管区现处于长江和珠江的分水岭地带，由于遭受两江流域长期的溯源侵蚀，形成多级剥夷面。而在直管区周缘，特别是直管区西侧的安顺-平坝一带，地表径流不仅多伏流地段，河流经过处也多发育“V”形河谷，指示区内至今仍处于强烈隆升之中，且地表径流与地下暗河在长期演化过程中可能出现较为频繁的袭夺。

6. 直管区岩溶主要发育期次

通过对直管区及邻区地层记录、构造活动综合分析，认为直管区自三叠纪以来主要经历了三期构造升降和两期构造挤压，结合最新年代地层表，由此将区内岩溶的形成与演化划分主要划分为3个期次(见图4)。

6.1. 第一期

直管区范围在结束海相连续沉积之后，进入第一期岩溶发育阶段，时间范围约为230~200 Ma。根据地层记录可以细分为三次构造隆升，并分别形成三桥组底部、二桥组底部以及二桥组顶部的假整合。地壳垂向升降导致构造隆升后的剥蚀作用从最新地层开始，而晚三叠世-早侏罗世区域地层沉积相分析指示直管区范围整体可能处于沉积面附近，地形起伏不大，加上延续的时间相对有限，很大程度上限制了第一期岩溶作用发育的程度。

宇(宙)	界(代)	系(纪)	统(世)	阶(期)	部分GSSP 年龄值(Ma)	主要假整合/ 不整合面	地层沉积 延续时限	构造活动 主体性质	构造 运动	直管区地形 地貌变化	岩溶 发育		
显生宙	新生代	第四系	全新统		▶ 0.0117	石脑组底部不整合		构造挤压	新构造运动	发生掀斜性、差异性、升降性构造直管区位于剥蚀区范围。	三期		
			更新统		▶ 2.58								
		新近系	上新统		▶ 5.333								
			中新统		▶ 23.03								
		古近系	渐新统	夏特阶					▶ 27.82				
				吕玻尔阶					▶ 33.9				
			始新统	普利亚本阶					▶ 37.71				
				巴顿阶					▶ 41.2				
				卢泰特阶					▶ 47.8				
				伊普里斯阶					▶ 56.0				
	古新统		▶ 66.0										
	中生界	白垩系	上白垩统	马斯特里赫特阶		▶ 72.1±0.2	茅台组底部不整合		构造挤压	燕山运动	位于沉积区，主体接受河流相沉积	二期	
				坎潘阶		▶ 83.6±0.2							
				圣通阶		▶ 86.3±0.5							
				康尼亚克阶		▶ 89.8±0.3							
				土伦阶		▶ 93.9							
			下白垩统	赛诺曼阶		▶ 100.5							
				阿尔布阶		▶ 113.0							
				阿普特阶									
			侏罗系	中侏罗统	巴雷姆阶								▶ 125.77
					欧特里夫阶								▶ ~132.6
		瓦兰今阶											
		侏罗系	上侏罗统	贝里阿斯阶									
				提塘阶									
			中侏罗统	钦莫利阶		▶ 154.8±0.8							
				牛津阶									
				卡洛夫阶									
				巴通阶		▶ 168.2±1.2							
下侏罗统			巴柔阶		▶ 170.9±0.8								
	阿林阶			▶ 174.7±0.8									
	托阿尔阶			▶ 184.2±0.3									
	普林斯巴阶			▶ 192.9±0.3									
三叠系	上三叠统	辛涅缪尔阶		▶ 199.5±0.3									
		赫塘阶		▶ 201.4±0.2									
三叠系	中三叠统	二桥组顶部假整合											
		二桥组底部假整合											
		三桥组底部假整合											
	下三叠统	瑞替阶											
		诺利阶											
		卡尼阶		▶ ~237									
下三叠统	拉丁阶		▶ ~242										
	安尼阶												
	奥伦尼克阶												
印度阶													

Figure 4. Main development stages of karst and their relationship with tectonic and sedimentation in Gui'an direct territory
图 4. 贵安直管区岩溶主要发育期次及其与构造和沉积作用的关系

6.2. 第二期

区域上，由燕山期构造挤压导致的地层褶皱变形自中侏罗世中期就已经开始，但直到早白垩世才在直管区范围体现出明显的构造响应，成为区内第二期岩溶作用的主要发育时段，时间大致为 145~100 Ma。晚白垩世地层中的三叠纪灰岩、白云岩砾石，是区内三叠系广泛暴露接受风化剥蚀的直接证据。但从上白垩统沉积相分析来看，燕山期构造活动对于直管区范围内的地形地貌改造主要体现在形成近 SN 向的断裂系和褶皱，并对局部强烈褶皱变形后的侏罗系、上三叠统剥蚀夷平，残存的地层指示区内地形整体

隆升程度不大。

6.3. 第三期

直管区第三期岩溶作用发生在新生代以来,对应的地层记录为上白垩统沉积之后,大致时间为 66 Ma 以来。区域上残留的少量古近系沉积,可能指示同期构造活动较弱,岩溶作用以水平发育为主。早渐新世之后,构造活动再次变得强烈,幕式挤压导致地壳间歇性抬升,同期形成 NE 向断层,局部切割了 SN 向断层。间歇性的地壳升降,为广泛岩溶的发育提供了条件。从野外调研结果看,区内多数溶洞的延伸和走向大致平行或低角度斜交于等高线,在不同海拔高度上的串联和贯通,体现了该期构造活动的多期次、间歇性特点。

已有研究认为,新近纪-早更新世为相对稳定期,地形地貌上具准平原化特点,在中更新世之后,伴随青藏高原强烈隆升才逐渐形成高原地貌[24]。由此推断,区内第三期岩溶的主要发育时间可能是在 2.58 Ma 以来,而地表水系的分布特征,也体现了现今构造的控制作用。整体而言,直管区典型岩溶管道的分布主要体现了与现今地形地貌之间的匹配,指示区内典型岩溶管道的形成时间较晚,暗示该期为直管区范围岩溶发育的高峰期。而随着地壳的不断隆升,第一期与第二期形成的岩溶管道被剥蚀殆尽,仍旧在不断发育和改造的第三期岩溶成为制约区内地下空间开发利用的主要不利因素。

7. 结论

通过本次研究,主要获得如下认识:

1) 在野外调研基础上,查明直管区内主要发育溶洞、地下河、岩溶漏斗及塌陷、泉点等多种类型的岩溶个体。通过对不同标高内出现频次的系统统计,查明了典型岩溶个体的分布规律,并对其关联性进行了简要分析。

2) 通过区域地层分布、特征及沉积相对比,结合构造演化史综合分析,重塑了直管区自三叠纪以来的沉积-构造演化过程,参考地层表进行时间标定,动态分析了沉积-剥蚀对地形地貌的影响,以此限定了直管区岩溶发育的主要时段。

3) 研究提出区内岩溶主要形成于 3 个期次:第一期为晚三叠世-早侏罗世(~230~200 Ma),第二期为早白垩世(~145~100 Ma),第三期为新生代以来(~66 Ma)。其中,第三期是区内岩溶管道发育的高峰时期,特别是 2.58 Ma 以来的多期构造升降形成不同海拔标高内典型岩溶管道的分布特征。

基金项目

本文受贵州省地矿局科研项目资助(编号:黔地矿科合[2019]26号)。

参考文献

- [1] 郝江南,袁志英.贵阳市中华北路岩溶塌陷成因及处理[J].贵州大学学报(自然科学版),2010,27(3):122-125.
- [2] 张罗致.贵阳市轨道交通1号线主要水文地质问题分析[D]:[硕士学位论文].成都:成都理工大学,2011.
- [3] 陈再谦,胡政.贵阳市轨道交通工程主要岩土工程问题[J].水力发电,2018,44(7):20-24+46.
- [4] 张可能,张岳,廖阳,等.贵阳某地铁站岩溶发育特征及突水模式分析[J].中国岩溶,2018,37(2):300-306.
- [5] 王中美,谭正莲.贵阳市岩溶地下水动态特征分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(1):27-32+42.
- [6] 代天豪,王中美,陈尧,等.贵阳花溪养牛村暗河枯水期岩溶水动态特征分析[J].中国岩溶,2019,38(4):546-551.
- [7] 杨秀丽,罗维,裴建国,等.贵阳市岩溶地下水水质变化特征浅析[J].中国岩溶,2017,36(5):713-720.
- [8] 王亚维,王中美,王益伟,等.贵阳市岩溶地下水水化学特征及水质评价[J].节水灌溉,2019(6):60-66.
- [9] 杨秀丽,曾群,苏泽志.贵阳市地下水污染现状评价及防治对策[J].贵州地质,2010,27(4):291-295.

- [10] 杨秀丽, 罗维, 邹胜章. 贵阳观山湖区至白云区地下水有机污染现状与防治对策[J]. 中国岩溶, 2015, 34(4): 375-381.
- [11] 王中美, 廖义玲, 李明琴, 等. 贵阳市水文地质条件及环境效应研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 226-229.
- [12] 王中美. 贵阳市岩溶地下水 4 种污染离子的空间分布特征[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(5): 158-164.
- [13] 陈璠, 陈进, 程星. 贵州省贵阳市环境地质问题及防治对策[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2014, 32(2): 116-120.
- [14] 牟远望, 孙柏榆, 蒋良江, 等. 贵阳市阅山湖地下水污染成因分析——以金牛泉为例[J]. 四川地质学报, 2023, 43(2): 324-329.
- [15] 贵州省地质调查院. 中国区域地质志贵州志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 1-1153.
- [16] 盘应娟, 赵磊, 杨璐, 等. 贵安直管区典型岩溶分布及地下空间利用建议[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(12): 1329-1336. <https://doi.org/10.12677/AG.2023.1312127>
- [17] 秦守荣, 张明发, 况忠, 等. 贵州茅台组的沉积环境[J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(4): 44-47.
- [18] 秦守荣, 张明发, 龚梅, 等. 贵州的印支运动[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(2): 100-104.
- [19] 翁文灏. 中国东部中生代以来之地壳运动及火山活动[J]. 地质学报, 1927(1): 12-40.
- [20] 张宏仁. “燕山运动”的分期及几个关键问题[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2176-2180.
- [21] 赵越, 高海龙, 张拴宏, 等. 回眸燕山运动——致敬“燕山运动”的创建者和中国地质学会的奠基人翁文灏[J]. 地质学报, 2022, 96(5): 1510-1523.
- [22] 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动” 90 周年[J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(6): 913-938.
- [23] 秦守荣, 刘爱民. 论贵州喜山期的构造运动[J]. 贵州地质, 1998, 15(2): 105-114.
- [24] 林树基, 刘爱民. 中生代板块活动与贵州地貌之演化[J]. 贵州地质, 1985, 2(2): 123-130.
- [25] 林树基. 贵州晚新生代构造运动的主要特征[J]. 贵州地质, 1993, 10(1): 10-17.