第 27 卷　第 5 期
2025 年　10 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27　No. 5
Oct.　2025

文章编号：1671-1505(2025)05-1273-17　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.054

淮南舜耕山下古生界岩溶发育特征及演化过程*

许光泉　贺　彪　何玉鹏　杨婷婷　张海涛　李　浩　张　著

安徽理工大学地球与环境学院，安徽淮南 232001

摘　要　华北煤田在深部煤炭资源开采过程中，深受下古生界岩溶突水灾害威胁。对裸露区岩溶发育特征及演化过程研究，对于揭示第四系松散层覆盖下岩溶地区的煤炭开采过程中储水、导水、突水等机制研究可以提供重要参考，对岩溶水害防治具有实际的指导性。以华北煤田南缘淮南舜耕山为研究对象，采用野外地质调查、地质剖面测量、岩溶角砾宏观与微观结构分析，以及成因演化分析等方法，系统揭示了下古生界岩溶发育类型与特征，并结合地区沉积与构造史，对岩溶形成与演化过程进行了探讨。结果表明：下古生界岩溶按形成时间分为沉积岩溶、后生岩溶及现代岩溶。沉积岩溶以同生岩溶角砾岩为标志，形成于沉积间断期，与古大气降水和海水进退及溶蚀作用密切相关。后生岩溶以成岩后发育的层间岩溶角砾岩以及燕山期拉张运动所形成的岩溶角砾岩为标志。该地区层间岩溶形成于早奥陶世地壳抬升期，因长期风化剥蚀和地下水流作用在岩层面间形成古岩溶坍塌与固结而成。构造角砾岩溶形成发生于下古生界地层内部，因多期拉张作用在破碎带内形成，并发生方解石多期结晶充填，被含铁质浸染。现代岩溶以溶沟及岩溶塌陷为标志，发育于层面拉张裂隙、断层或二者交汇处，因长期大气降水入渗以及重力垮塌或潜蚀作用所致。

关键词　下古生界岩溶　岩溶角砾岩　沉积岩溶　构造角砾岩溶　现代岩溶　淮南舜耕山

第一作者简介　许光泉，男，1967 年生，博士、教授，主要从事水文地质教学与科研工作。E-mail：gqxu67@163.com。

通讯作者简介　贺彪，男，2000 年生，硕士研究生，从事水文地质科研工作。E-mail：hebiao2000@126.com。

中图分类号：P588.24^{+}5　　**文献标志码**：A

Development characteristics and evolution process of the Lower Paleozoic karst in Shungeng mountain, Huainan, Anhui Province

XU Guangquan　HE Biao　HE Yupeng　YANG Tingting　ZHANG Haitao　LI Hao　ZHANG Zhu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Anhui Huainan 232001, *China*

Abstract　During the exploitation of deep coal resources, the North China Coalfield faces severe threats from karst water inrush disaster originating from the Lower Paleozoic aquifer. Investigating the development characteristics and evolution processes of karst in outcrops provides critical insights into mechanisms such as water storage, water conductivity, and water inrush during coal mining in karst regions covered by Quaternary unconsolidated deposits. This research also offers practical guidance for the

*国家自然科学基金项目（编号：42172279，41572147）、省级质量工程项目（编号：2023xnjys012）联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172279, 41572147), and the Quality Engineering Project of Higher Education Institutions of Anhui Province (No. 2023xnjys012)]

收稿日期：2024-04-24　　改回日期：2025-01-10

prevention of karst water rush hazards. Taking the Shungeng Mountain area in Huainan-located at the southern margin of the North China Coalfield as the study area, this work systematically investigates the types and characteristics of Lower Paleozoic karst through field geological survey, geological profile survey, macro-and micro-structural analysis of karst breccias, and genetic evolution studies, all integrated with the region's sedimentary and tectonic history. The results show that the Lower Paleozoic karst can be divided into three types based on development timing: sedimentary karst, epigenetic karst and modern karst. Sedimentary karst, characterized by syngenetic karst breccia, was formed during sedimentary discontinuities and was closely related to paleo-atmospheric precipitation, marine transgressions and regressions and dissolution. Epigenetic karst is marked by the interlayer karst breccia developed after diagenesis, and the karst breccia formed by Yanshan stretching movement. The interlayer palaeokarst was formed during the crustal uplift of the Early Ordovician, and was formed by the collapse and consolidation of the karst between the layers of strata due to long-term weathering-erosion and the action of groundwater flow. The tectonic breccia karst occurred in the Lower Paleozoic internal strata, due to the multi-stage tensile structure, which formed in the fracture zone, and was filled with the multi-stage crystallization of calcite, impregnated with iron. The modern karst is marked by the dissolved channel and karst collapse, which develops in the plane tension fissures, faults or intersection of both, and is caused by long-term atmospheric precipitation and infiltration, gravity collapse or subsurface erosion.

Key words Lower Paleozoic karst, karst breccia, sedimentary karst, tectonic breccia karst, modern karst, Shungeng mountain in Huainan

About the first author XU Guangquan, born in 1967, PhD, professor, is mainly engaged in teaching and research on hydrogeology. E-mail: gqxu67@163.com.

About the corresponding author HE Biao, born in 2000, master student, is engaged in hydrogeological research. E-mail: hebiao2000@126.com.

1 概述

华北板块下古生界岩溶为寒武系、奥陶系碳酸盐类物质在多期构造运动过程中，经溶蚀、流水冲刷、潜蚀和崩塌或沉积等作用所产生各种岩溶现象。自加里东运动开始，经海西、印支、燕山、喜马拉雅和新构造运动所形成的裸露型、覆盖型和埋藏型等类型岩溶。它不仅为地下水和油气提供重要储存场所，也是地下岩溶地区突水溃砂的重要通道（Yang and Xiao，2016；刘波和肖红飞，2019；邹洋等，2021）。因此，给矿山开采、隧道施工和城市工程建设带来严重的岩溶突涌水灾害问题。

中国华北煤田在煤炭资源开采过程中，深受下古生界岩溶发育程度影响，表现为岩溶含水性、富水性、储水性及岩溶通道的导、突水性上，给矿山安全生产带来严重威胁（张党育等，2020；吴金随等，2022；徐斌等，2023）。因此，开展裸露区下古生界寒武系和奥陶系岩溶分布、发育特征研究，并从机理上弄清其形成与演化过程对于隐伏区煤炭资源开采过程中矿山岩溶水害防治具有十分重要指导意义。以往通过对华北地区下古生界碳酸盐岩裸露区和隐伏区地质调查和研究，结合宏观和微观分析方法，初步分析了岩溶发育类型和成因（武雄等，2007；虎维岳，2010；许光泉等，2016），弄清了岩溶储集层特征（闫伟，2019）及碳酸盐岩储集层空间分布（邵红梅，2015；程鑫等，2020）。位于华北煤田南缘的淮南煤田是华东地区重要煤炭能源基地。近年来，煤田范围内潘二矿“5.25”突水、张谢矿区构造带岩溶（含陷落柱）揭露，尤其是目前深部 A 组煤层开采，与下古生界奥陶系和寒武系的岩溶水息息相关，其中沉积岩溶和层间岩溶为地下水提供储水空间，而构造岩溶不仅储存地下水，同时也是岩溶突水的主要通道，对深部煤炭资源开采安全构成了严重的威胁（甘林堂，2018；管笛，2021）。该地区岩溶发育过程，除了与早期沉积环境有关外，还受到多期地质构造运动叠加影响。岩溶较为发育，主要以溶

隙、溶孔、溶洞、岩溶塌陷和陷落柱等岩溶现象出现（武强等，2000；许光泉和沈惠珍，2004；詹润等，2017）。

以往对淮南煤田的研究主要围绕岩溶发育模式、形成机理、地下水补给、陷落柱形成与演化，以及与含水层间水力联系等方面，开展了初步研究（王祯炜和张朱亚，1985；李小明等，2010；程广琪等，2013；黎志豪等，2018；张海涛，2021；许光泉等，2022；杨婷婷等，2024）。为进一步探讨华北煤田下古生界岩溶发育特征及成因，本研究以淮南舜耕山为研究对象，采用野外地质调查、岩溶地质剖面测量、宏观和微观结构分析等方法，并从成因分析的角度进一步揭示其形成演化过程，从而为深部煤炭资源开采过程中系统认识岩溶水害形成条件及如何进行水害防治提供依据。

2　地质背景

淮南煤田位于华北煤田南缘，地处扬子和华北两大板块碰撞带，自东向西长约 16.0 km，宽约 3.0~4.0 km，为一南北对冲、中间为挤压型复向斜构造的煤田。本次研究范围位于淮南煤田南部的断块，为叠瓦状推覆体露头区，发育寒武系和奥陶系等下古生界岩溶地层。

下古生界由新至老主要为奥陶系马家沟组、萧县组、贾汪组，以及寒武系土坝组、崮山组、张夏组、徐庄组、毛庄组、馒头组、猴家山组等。岩性主要以灰岩为主，白云岩及泥质白云岩次之。

研究区北边为舜耕山逆断层，南边为阜李正断层，东边为武店断层，西边与罗山推覆体以推覆平移断层相连，夹片内部地层呈倾斜倒转状，因推覆挤压作用，由东至西地层倾角由 80°变为 40°，并发育南北向平移断层（图 1）。

3　岩溶发育特征

岩溶按形成时间分为古岩溶和现代岩溶 2 大类。古岩溶按其成因，又进一步划分为沉积岩溶和后生岩溶。

下古生界岩溶因受岩性、岩层结构、地质构造和地下水流等作用，在沉积间断面、拉张层面、可溶与非可溶岩接触面、断层与裂隙的网络交汇处等位置较为发育，如表 1。

3.1　沉积岩溶发育特征

沉积岩溶主要形成于沉积间断期，整个华北地区在沉积过程中出现了短时间海退，使得半固结碳酸盐岩暴露于地表，遭受了风化剥蚀作用（张泓等，2003），且受到了海水的强烈侵入和冲刷作用，并在海水进退过程中因流水的冲刷进而发生碎裂，最终形成碳酸盐岩碎屑，并沿层面堆积而成（Rehfisch and Webb，1993；刘占国等，2021）。在奥陶系萧县组下部，沉积岩溶以同生岩溶角砾为标志（李文厚等，2020），分布于洞山—九龙岗一带，以薄—中厚层白云质灰岩为主，角砾粒径为 0.3~7.0 cm，粒间多为钙质、泥质充填胶结，角砾沿岩层呈层状分布，岩石类型为白云质灰质角砾岩、角砾质灰岩，分选性差，为次圆和次棱角状，如图 2。

此外，同生岩溶角砾岩在成岩过程中还因地形差异，产生了重力滑塌作用，在洞山与九龙岗一带的萧县组底部所出露沉积角砾岩具有明显的重力滑塌变形现象，形成塌积型岩溶角砾岩。

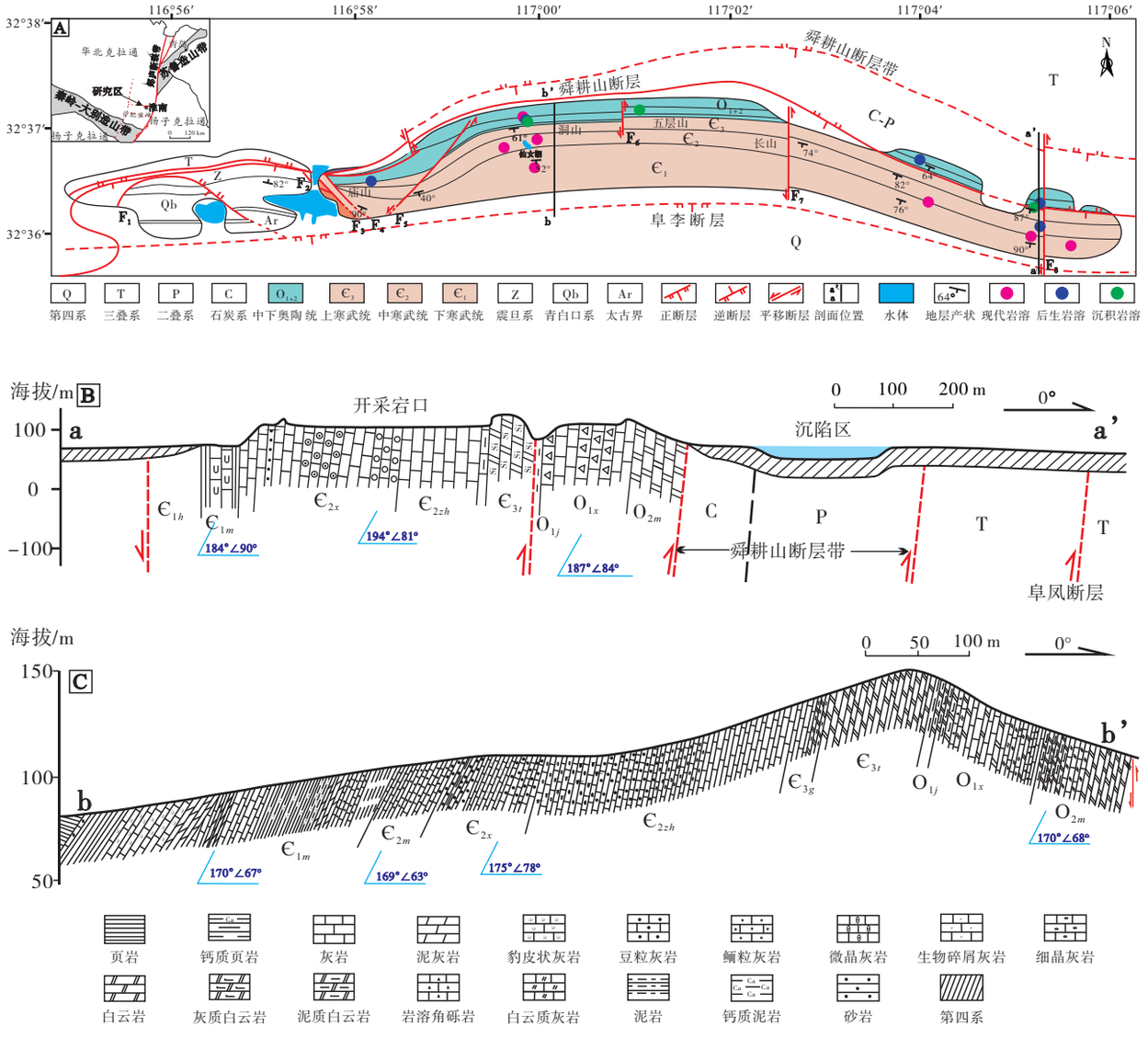
在显微镜下，同生岩溶角砾为大小相差悬殊的隐晶质白云质灰质岩屑，含方解石、白云石颗粒，存在一定的溶蚀现象（图 3-A 至 3-F），微裂隙较为发育（图 3-G），但大多裂隙被方解石脉所充填（图 3-H，3-I）。

3.2　后生岩溶发育特征

下古生界碳酸盐岩地层形成后，受加里东抬升、印支挤压和燕山拉张等叠加作用影响，其岩层结构完整性遭受多期次的破坏，也形成以角砾岩为标志的后生岩溶（Ni *et al.*，2019），在断裂带交汇部位，碳酸盐岩溶孔较为发育，存在溶蚀现象。随着后期溶蚀作用的加强，所形成的断层、裂隙以及溶隙等为岩溶地下水提供了储存和径流通道，从而为后生岩溶持续发育提供外部条件（Fu，2019；Zhang *et al.*，2021a），往往沿层面不断发生冲刷、搬运和坍塌以及拉张和垮落作用等，层间岩溶角砾岩与构造岩溶角砾岩为这一阶段的标志性产物。

3.2.1　层间角砾岩溶特征

在早奥陶世，加里东运动导致整个华北地台发生震荡性的抬升，出露的碳酸盐岩经历了漫长的风化剥蚀作用，与此同时，古大气降水以地表径流和地下入渗方式，从最初化学溶蚀作用，发展到机械



A—基岩地质平面图；B—a-a’地质剖面图；C—b-b’地质剖面图

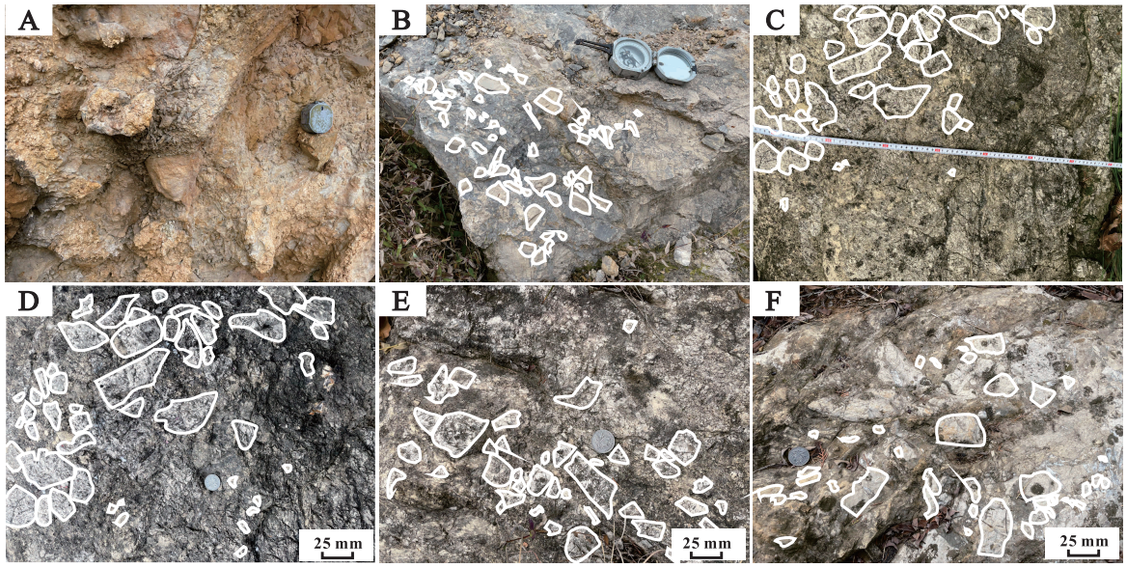
图 1 淮南舜耕山下古生界基岩地质图

Fig. 1 Geological map of the Lower Paleozoic bedrock in Shungeng mountain, Huainan

表 1 淮南舜耕山下古生界地层、岩性与岩溶发育关系

Table 1 Relationship between Paleozoic strata, lithology, and karst development in Shungeng mountain, Huainan

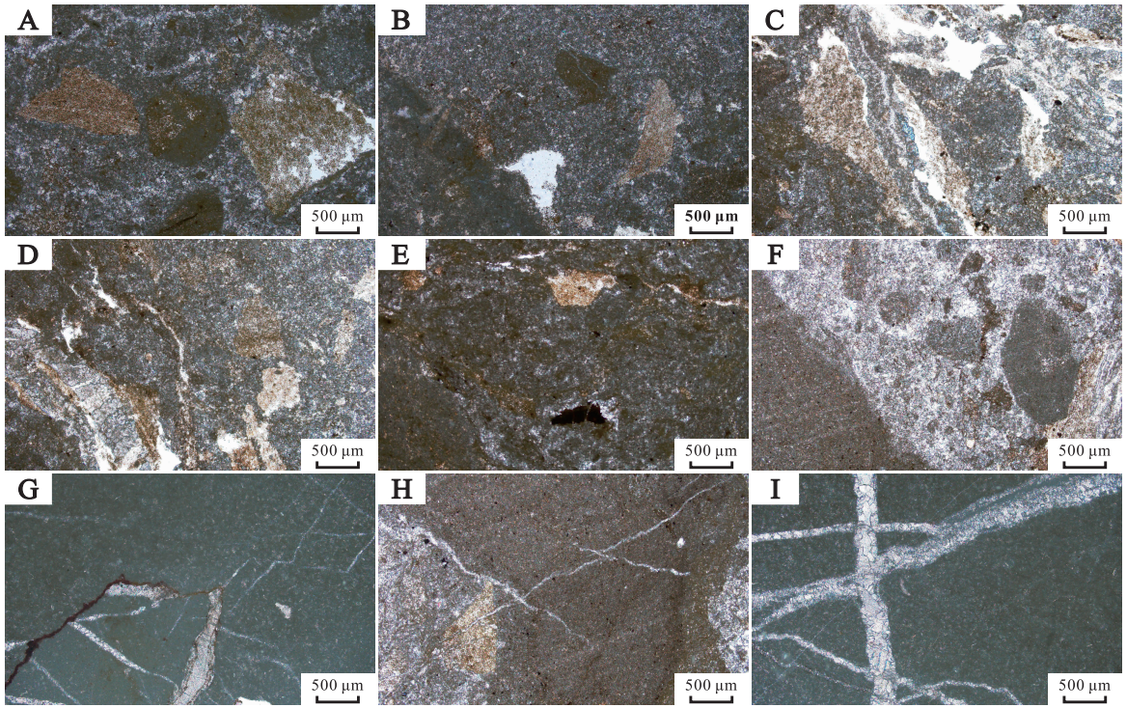
调查地点	岩溶发育层位	岩性特征	岩溶发育特征
洞山	O_2m(马家沟组)	白云岩、白云质灰岩	不同尺度溶沟和溶隙
洞山、九龙岗	O_1x(萧县组)	灰岩、白云质灰岩、白云岩	同生、后生岩溶角砾岩
洞山、九龙岗	O_1x(萧县组)	灰岩、白云质灰岩、白云岩	后生岩溶角砾岩
九龙岗	ϵ_2zh(张夏组)	灰岩、白云质灰岩	构造岩溶角砾岩
九龙岗	ϵ_2x(徐庄组)	生物碎屑灰岩、豆粒灰岩、砂岩	沿裂隙网络发育溶沟
洞山	ϵ_2x(徐庄组)	豆粒灰岩、藻灰岩、砂岩	网络裂隙、溶隙、溶洞与岩溶塌陷
九龙岗	ϵ_1mz(毛庄组)	灰岩、豆粒灰岩	网络裂隙、岩溶塌陷
洞山	ϵ_1m(馒头组)	生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩	沿非可溶岩与可溶接触面发育溶沟、岩溶塌陷



A—白云质灰质角砾岩；B—白云质灰质角砾岩，次棱角状；C—白云质灰质角砾岩，次圆状；D—白云质角砾岩，次棱角状，无序排列；E—白云质角砾灰岩，次棱角状；F—灰质角砾灰岩，次棱角状

图 2　淮南舜耕山九龙岗—洞山奥陶系萧县组同生岩溶角砾岩宏观结构特征

Fig. 2　Macrostructure characteristics of syngenetic karst breccia of the Ordovician Xiaoxian Formation in Jiulonggang-Dongshan, Shungeng mountain, Huainan



A—角砾灰岩，颗粒为隐晶质灰岩颗粒；B—角砾灰岩，为隐晶质灰岩岩屑，其次为微晶灰岩颗粒；C—泥晶—亮晶角砾灰岩，溶蚀孔隙被细晶—亮晶方解石充填；D—泥晶—亮晶角砾灰岩，裂隙被方解石脉充填；E—角砾灰岩，为灰岩岩屑，溶孔较发育；F—角砾灰岩，主要灰岩岩屑，方解石脉充填；G—隐晶质灰岩颗粒，方解石脉充填；H—角砾颗粒为隐晶质灰岩岩屑；I—角砾颗粒为隐晶质灰岩岩屑，裂隙被方解石脉充填

图 3　淮南舜耕山九龙岗—洞山奥陶系萧县组同生岩溶角砾岩显微结构特征

Fig. 3　Microstructure characteristics of syngenetic karst breccia of the Ordovician Xiaoxian Formation in Jiulonggang-Dongshan, Shungeng mountain, Huainan

冲刷、搬运，直到后期重力垮塌作用发生（张海涛，2021）。层间岩溶主要分布在洞山—九龙岗一带，位于奥陶系萧县组与马家沟组沉积间断位置，厚度为 12.0~16.3 m，沿走向发育，以岩溶角砾岩为特征，在角砾岩屑结构、岩性上存在有一定差异性，分为基底式胶结和孔隙式胶结类型。其中，基底式胶结中角砾岩成分主要为灰岩岩屑，砾径在 0.2~10 cm 间，以次棱角、次圆状为主（图 4-A 至 4-D）；其次为白云质角砾岩，颗粒表面有溶痕，砾径为 0.5~4 cm，分选性差，以次棱角为主（图 4-E）。

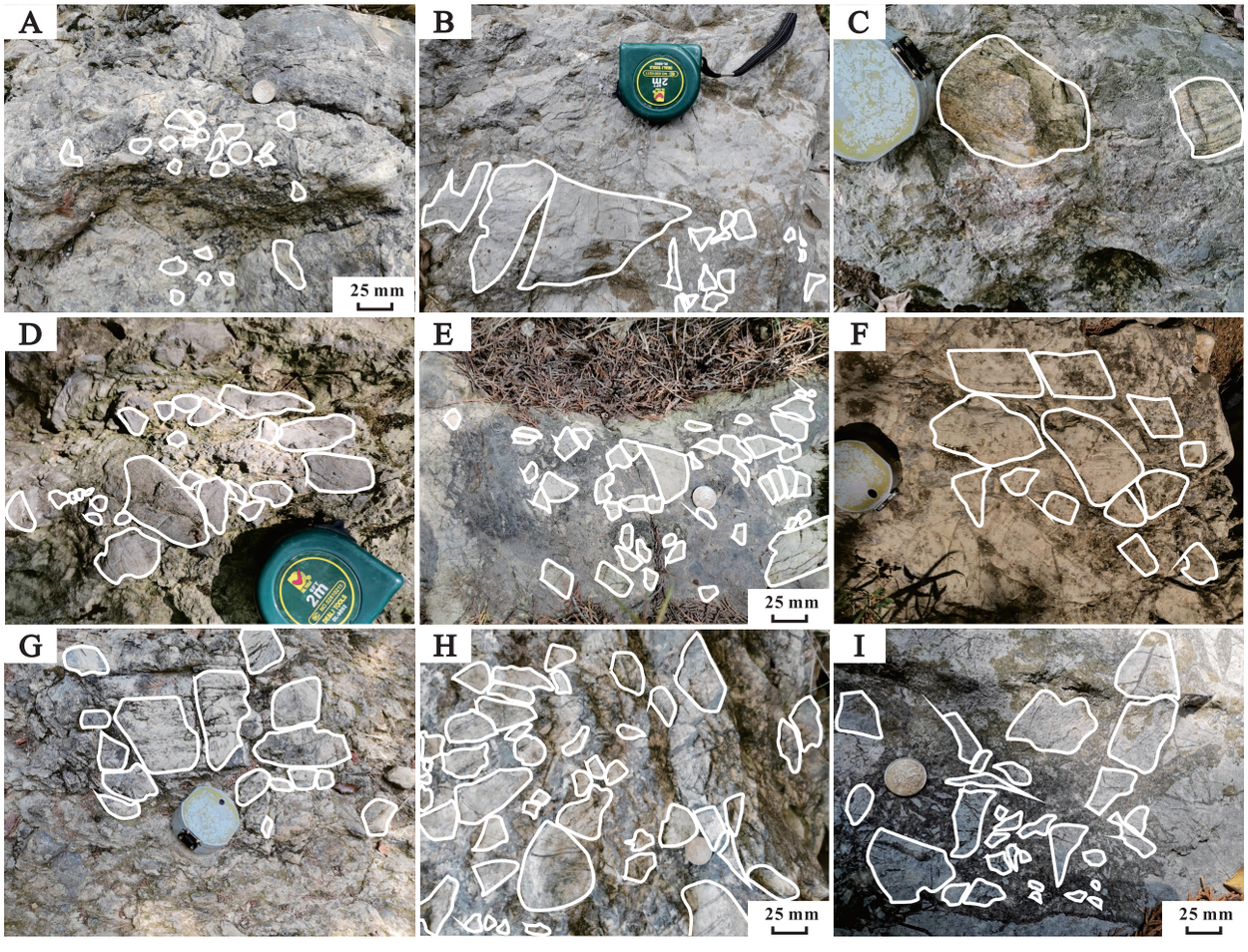
孔隙式胶结主要以白云质灰岩岩屑为主，砾间为泥质、钙质充填胶结，砾径为 0.5~10 cm，为次棱角状（图 4-F），具有定向性（图 4-G，4-H）；岩溶角砾形成后，因地下水流沿裂隙发生渗流溶蚀作用，多为棱角状、次圆状（图 4-I）。此外，在层间岩溶的顶板存在明显流水冲刷痕迹。

显微镜下，角砾灰岩以隐晶质为主，含少量方解石颗粒，且大颗粒岩屑含小颗粒岩屑（图 5-A 至 5-D）。微裂隙发育，少数被白云石及隐晶质玉髓充填（图 5-E，5-F），部分裂隙被有机质充填（图 5-G），后期被方解石脉所充填（图 5-H 至 5-L）。

3.2.2 构造角砾岩溶特征

构造角砾岩溶是指在构造地质应力作用下，对岩层产生破坏，并在水、热流体共同作用下发生溶蚀和胶结作用共同形成（郝金月等，2021）。

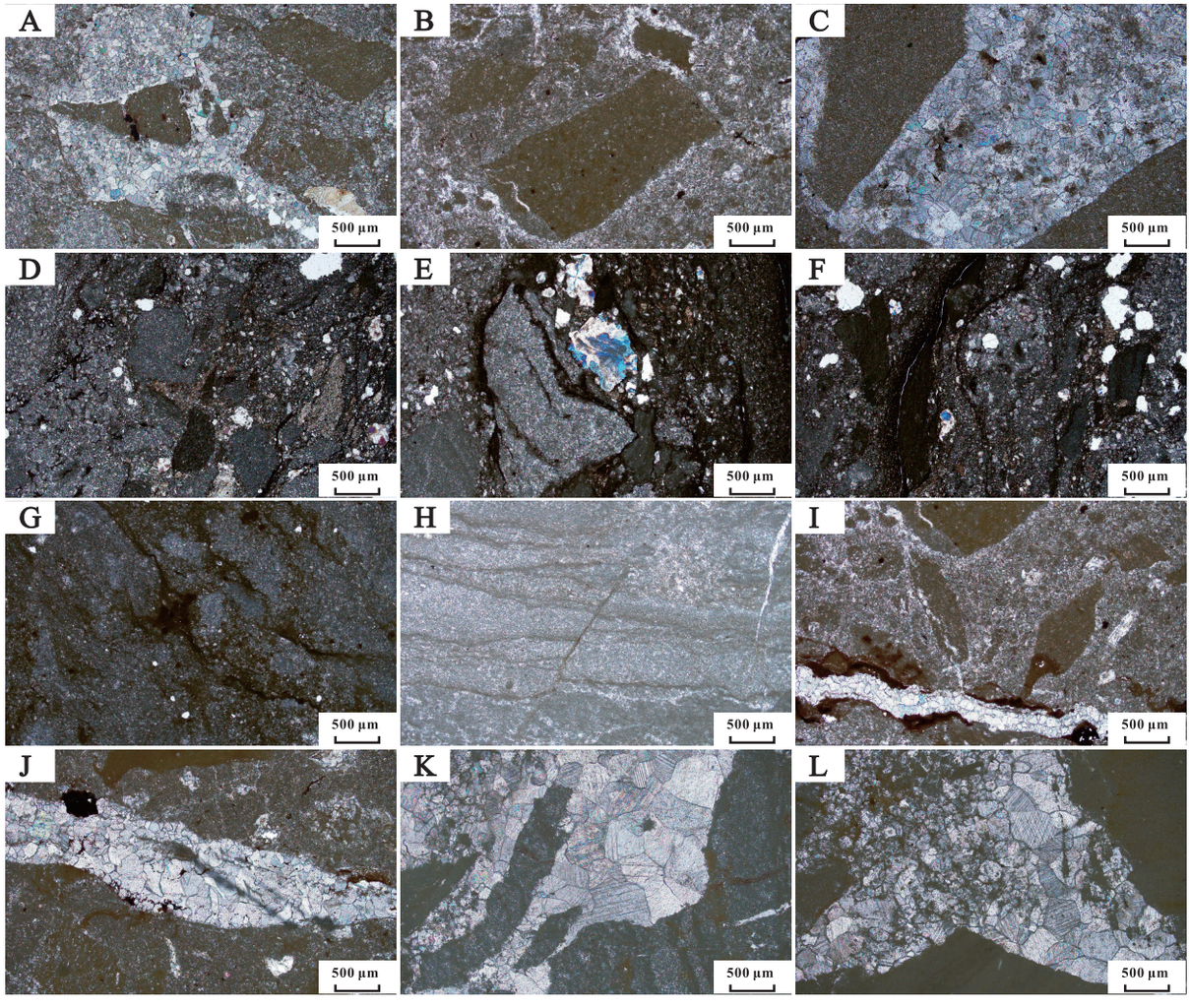
研究区内受多期燕山构造地质作用，在九龙岗一带表现较为明显，沿垂直于寒武系统徐庄组、张



A—含泥白云质角砾岩屑（洞穴坍塌）；B—内部充填角砾岩颗粒（洞穴坍塌）；C—角砾之间为杂基，角砾分布紊乱；D—含泥质胶结，角砾分布紊乱；E—角砾为浅色白云石岩屑、基质为灰岩，杂基支撑，角砾岩屑无定向排列；F—裂缝角砾岩；G—角砾之间发生定向排列，为镶嵌角砾岩；H—角砾为白云质灰岩；I—角砾为灰岩岩屑，无序排列

图 4 淮南舜耕山奥陶系层间岩溶角砾岩宏观特征

Fig. 4 Macroscopic characteristics of the Ordovician interlayer karst breccia in Shungeng mountain, Huainan



A—角砾灰岩，颗粒为隐晶质灰岩颗粒和方解石颗粒；B—角砾灰岩，为隐晶质灰岩岩屑，大颗粒岩屑含小颗粒岩屑；C—角砾灰岩，为隐晶质灰岩岩屑；D—岩屑灰岩，主要由隐晶质灰岩颗粒和少量的方解石颗粒组成；E—角砾灰岩，主要为灰岩岩屑，由隐晶质泥质方解石组成；F—角砾灰岩，为隐晶质灰岩颗粒；G—角砾灰岩，裂隙被有机质充填；H—角砾为灰质白云岩，纹理发育，裂隙相互切割；I—角砾灰岩，主要为灰岩岩屑，裂隙被后期方解石脉充填；J—白云质角砾岩，为白云石岩屑颗粒；K—白云质角砾岩，颗粒间有溶蚀痕迹；L—白云质角砾岩，白云质岩屑，有水流冲刷痕迹

图 5　淮南舜耕山奥陶系层间岩溶角砾显微结构特征

Fig. 5　Microstructure characteristics of the Ordovician interlayer karst breccia in Shungeng mountain, Huainan

夏组地层走向上发育多组宽度不一构造拉张带，如图 6。带内为结晶方解石脉充填，在拉张裂隙宽度大的构造带内，发育岩溶角砾岩，颗粒大小悬殊，分选性和磨圆度差，岩屑角砾为原地深灰色灰岩岩屑，砾径为 0.8～40 cm，后为方解石脉所充填胶结，岩屑颗粒间为多期方解石结晶(图 7-A 至 7-C)，局部地段有铁质浸染状，并结晶填充。

在角砾岩屑间所充填方解石脉，颗粒间方解石有多次结晶现象，围绕颗粒周围，方解石晶体由小到大生长，为栉壳状，直径为 5～8 mm(图 7-D，7-E)。此外，在构造带内发育厚层状方解石脉(图 7-F)。

显微镜下,构造角砾灰岩由不同尺寸的灰岩岩屑及方解石颗粒组成(图 8-A 至 8-G)，角砾内有大量的溶蚀孔(图 8-E)，且含有铁质浸染(图 8-F，8-G)。其中，角砾灰岩下部为白云石岩屑颗粒，被裂隙切割，并被方解石填充(图 8-H，8-I)。

3.3　现代岩溶发育特征

现代岩溶是在现代水文地质作用下所形成的岩

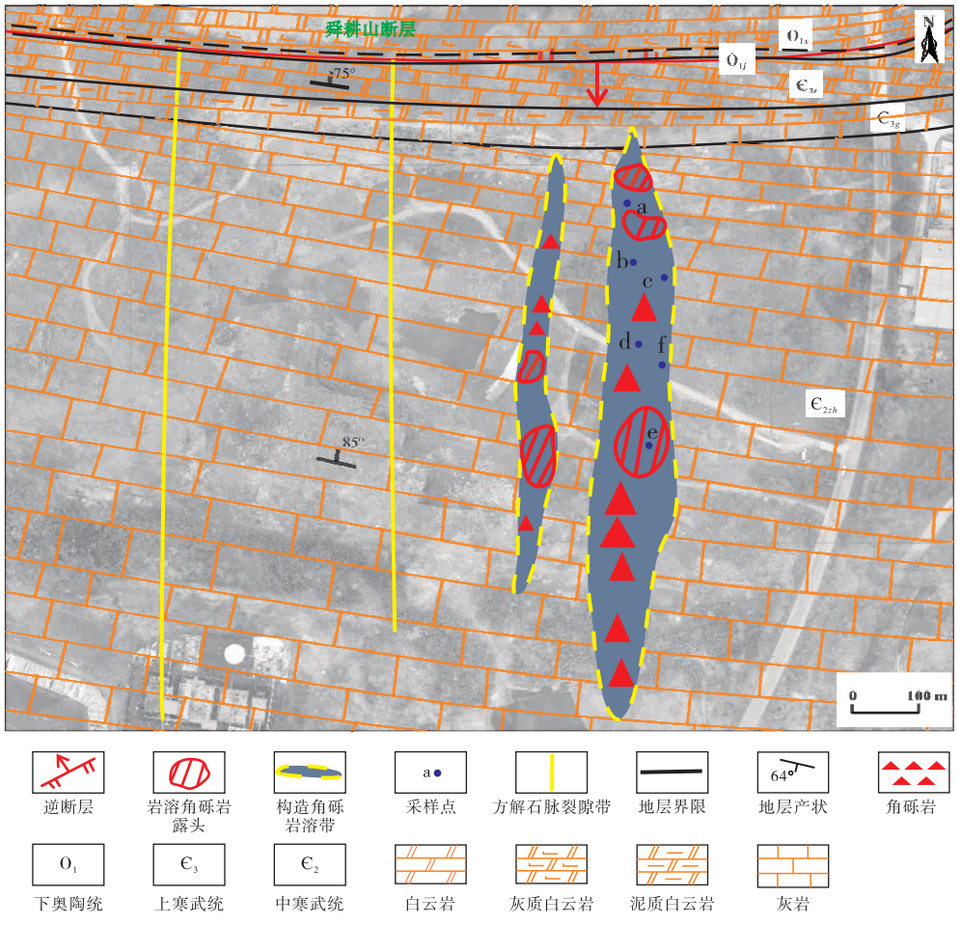


图 6 淮南舜耕山九龙岗构造岩溶角砾岩溶发育位置

Fig. 6 Development location of tectonic karst breccia in Jiulonggang in Shungeng mountain, Huainan

溶，具有一定继承性（袁道先等，2016），研究区内现代岩溶主要以碳酸盐岩溶沟及岩溶塌陷为代表。

3.3.1 溶沟

溶沟主要发育在寒武系馒头组、徐庄组和奥陶系马家沟组，出露于洞山、五层山以及九龙岗一带。

洞山寒武系馒头组溶沟沿着层面和构造裂隙面发育，受地形地貌及岩层组合影响。该段岩性分为上、下 2 层，下层为紫红色泥岩隔水层；上层为浅灰色厚层状豹皮状灰岩、微晶灰岩、泥灰岩等。溶沟宽为 0.3～1.6 m，长为 1.4～19.8 m，由层面和构造裂隙面形成溶沟网络，如图 9。

奥陶系马家沟组，以白云岩为主，其溶沟沿层面和裂隙走向发育，宽为 0.8～1.67 m，长为 10～16 m，受长期大气降水、地表径流影响，发生冲刷与溶蚀所致，如图 10。

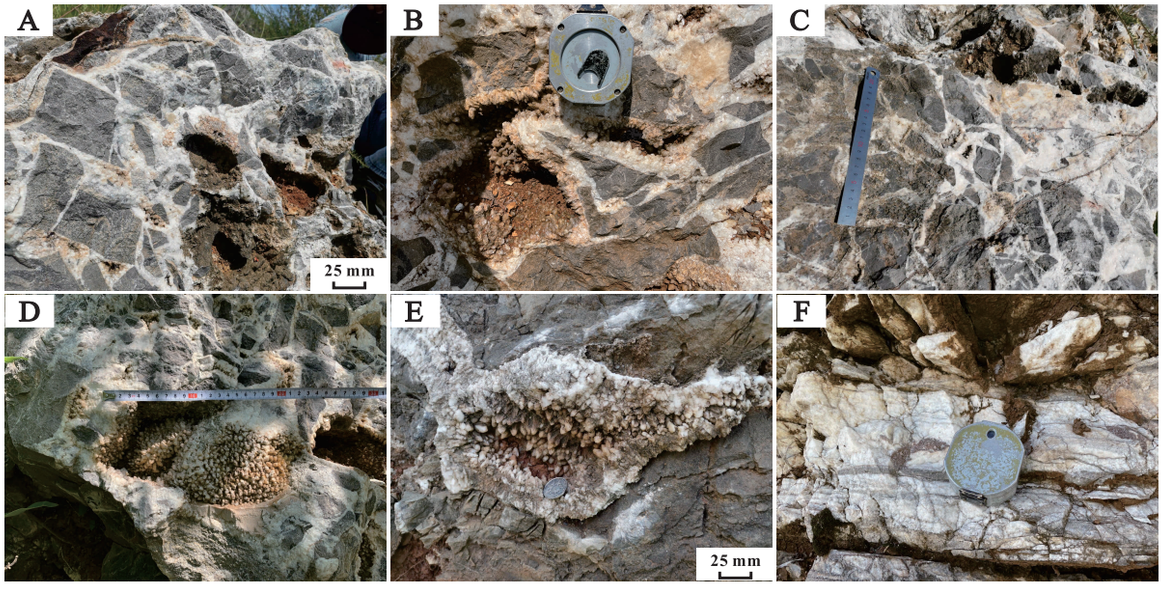
显微镜下为微晶砾屑结构，主要为白云石，微裂隙发育，但大部分被含泥质方解石脉所充填(图 11-A，11-B)，颗粒间为溶蚀镶嵌接触，表面发育龟纹(图 11-C)。

3.3.2 岩溶塌陷特征

岩溶塌陷主要位于寒武系毛庄组、徐庄组及奥陶纪萧县组。在九龙岗一带，沿着毛庄组灰岩与泥岩接触面，在拉张裂隙层面与构造裂隙面交汇处，形成多处岩溶塌陷，在周围发育 X 型节理，形成以 NNE 和 NNW 向的裂隙网络，如图 12、表 2 所示。

在洞山一带的寒武系徐庄组中厚层生物碎屑灰岩、豆粒灰岩以及藻灰岩内，沿层面上发育了裂隙、溶隙以及岩溶塌陷等现象，发育 X 型节理，裂隙率大于 10 条/m，多为 NNW 和 N 向，与岩层面成直交或斜交，如图 13。

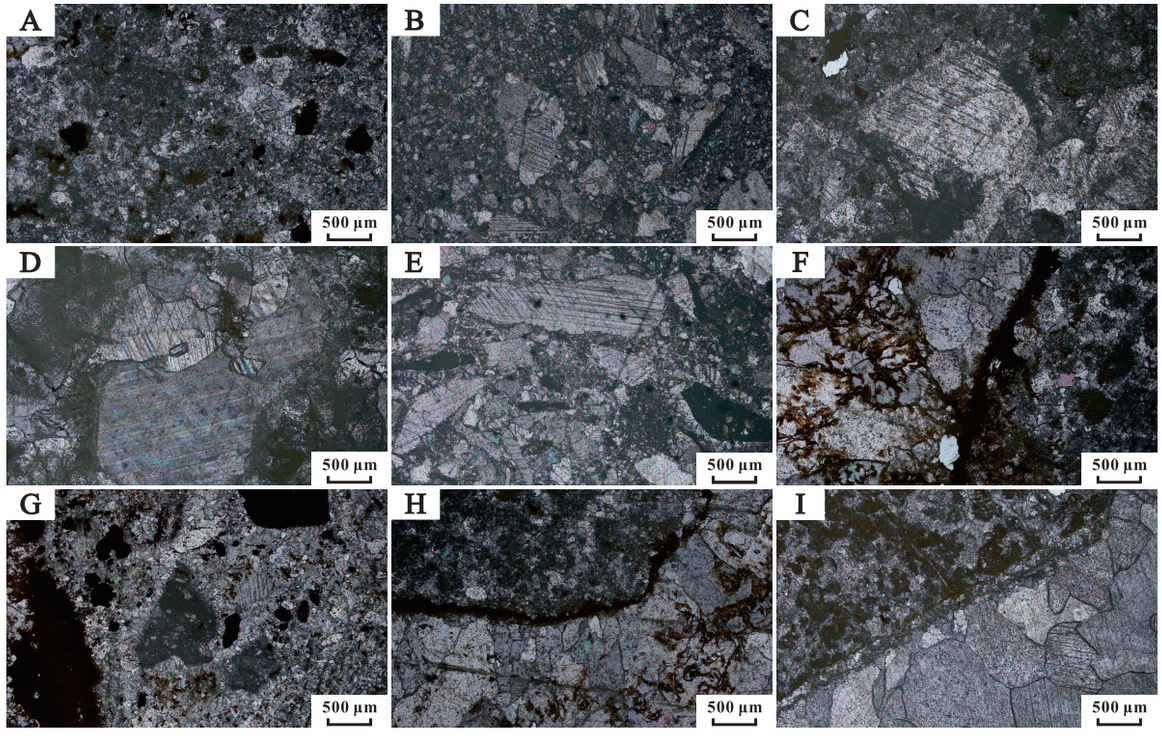
在显微镜下，主要为生物碎屑灰岩和藻灰岩，内部发育裂隙、缝合线，被方解石脉所充填，如图 14。



A—角砾灰岩，棱角状为主，被方解石脉胶结充填，含铁质；B—角砾灰岩，棱角状为主，角砾间被壳状方解石和方解石脉所充填，含铁质；C—角砾灰岩，颗粒大小悬殊，为方解石脉充填；D—角砾灰岩，粒间为方解石结晶体和方解石脉充填；E—角砾间被方解石晶簇充填；F—方解石脉，呈层状分布，厚度为 40~50 cm

图 7　淮南舜耕山九龙岗构造岩溶角砾岩宏观特征

Fig. 7　Macroscopic characteristics of tectonic karst breccia in Jiulonggang in Shungeng mountain, Huainan



A—角砾灰岩，角砾为灰岩岩屑，溶孔较为发育；B、C、D、E—角砾灰岩，由大小不一的隐晶质颗粒和少量方解石组成；F、G—角砾灰岩，溶孔发育，被铁质浸染；H—上部为灰岩岩屑颗粒，下部为白云石岩屑颗粒，裂隙发育，含铁质浸染；I—上部为灰岩岩屑，下部为白云石岩屑，具有压溶结构

图 8　淮南舜耕山九龙岗构造岩溶角砾岩显微结构

Fig. 8　Microstructure characteristics of tectonic karst breccia in Jiulonggang in Shungeng mountain, Huainan

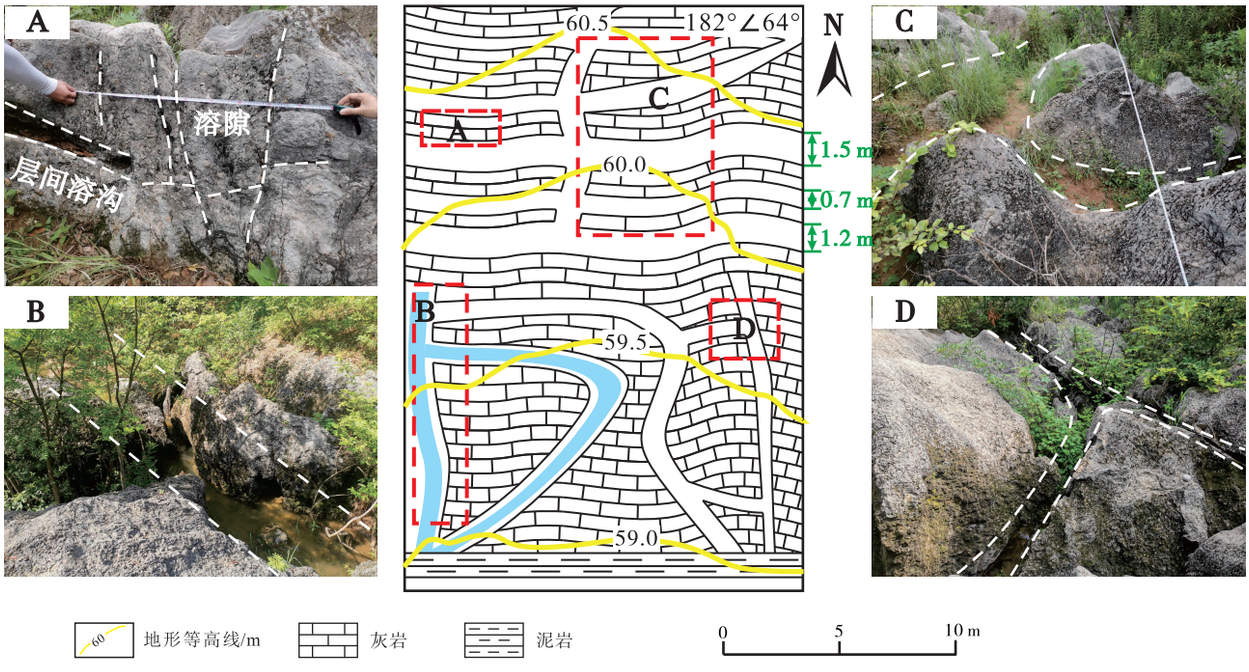
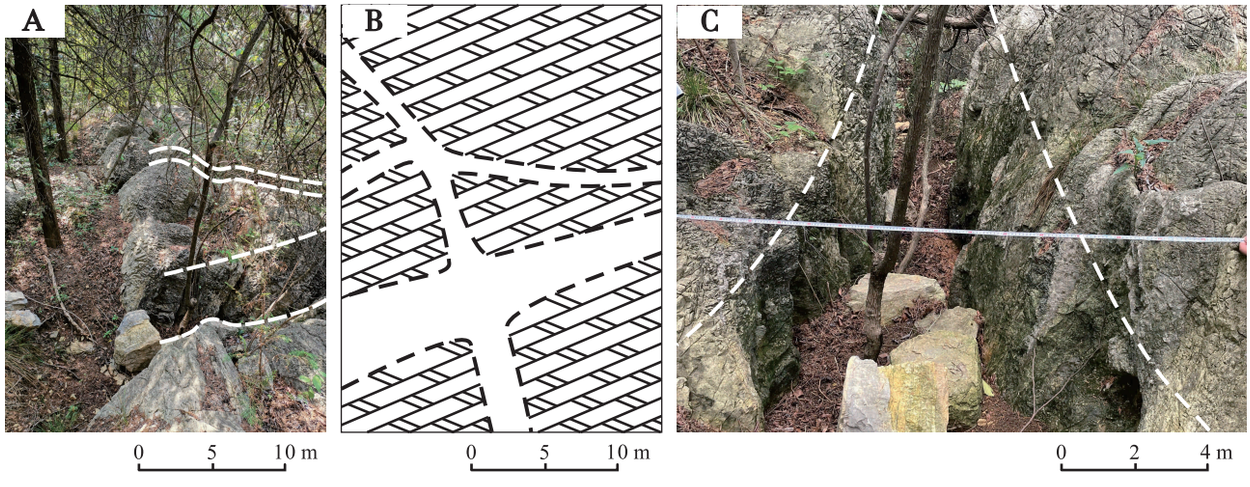


图 9 淮南舜耕山寒武系馒头组溶沟

Fig. 9 Karst ditch of the Cambrian Mantou Formation in Shungeng mountain, Huainan



A—沿地层走向方向发育的溶沟；B—沿走向和倾向方向发育的溶沟素描图；C—沿地层倾向方向发育的溶沟

图 10 淮南舜耕山奥陶系马家沟组溶沟

Fig. 10 Karst ditch in the Ordovician Majiagou Formation in Shungeng mountain, Huainan

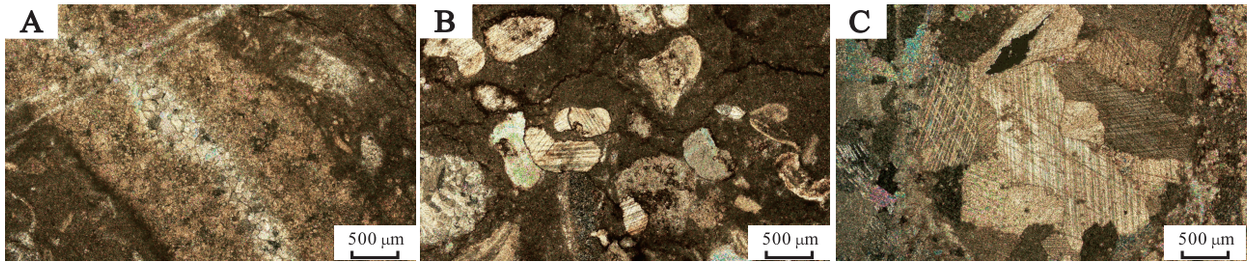
4 岩溶演化过程

舜耕山岩溶发育形式多样，其形成演化过程差异性也较大，具体如下。

4.1 沉积岩溶演化过程

本区沉积岩溶主要发生在奥陶系萧县组下部，以白云质岩溶角砾岩为标志特征，如图 2。在加里东运动发生前，华北地区属于浅表海环境，海水处于时进时退的震荡运动，导致在沉积过程发生间断期，半固结状的碳酸盐岩层暴露于地表，在大气降水和海水混合作用下，处于一个半封闭、弱氧化—弱还原的同生成岩环境。沉积岩溶间歇性暴露时间长短对角砾岩形态、厚度有着不同程度影响，按其演化时间分为：短期、中期、长期以及溶蚀充填覆盖期等 4 个阶段。

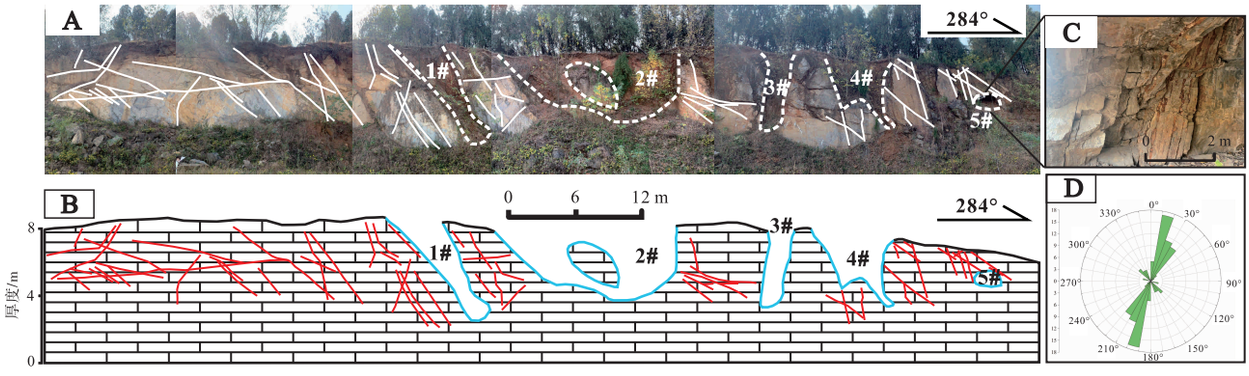
短期暴露：半固结的白云岩被大气淡水所溶



A—2 条方解石脉，脉内为微晶颗粒；B—脉内方解石被溶蚀，呈颗粒状；C—白云石颗粒，表面发育微裂隙网络，呈龟纹状

图 11　淮南舜耕山奥陶系马家沟组微晶砾屑灰质白云岩显微结构特征

Fig. 11　Microstructure characteristics of microcrystalline gravelly limestone dolomite in the Ordovician Majiagou Formation in Shungeng mountain, Huainan



A—毛庄组野外照片；B—毛庄组素描图；C—溶洞内部照片；D—裂隙走向玫瑰花图

图 12　淮南舜耕山九龙岗寒武系毛庄组现代岩溶地质剖面

Fig. 12　Modern karst geological section in the Cambrian Maozhuang Formation in Jiulonggang in Shungeng mountain, Huainan

表 2　淮南舜耕山九龙岗寒武系毛庄组岩溶发育特征

Table 2　Karst development characteristics of the Cambrian Maozhuang Formation in Jiulonggang in Shungeng mountain, Huainan

编号	岩溶形态	几何尺寸		特征描述
		长度/m	宽度/m	
1#岩溶塌陷坑	长条状	6	2.5	厚层生物碎屑灰岩沿层面和构造裂隙交汇处，发育大小不一的裂隙、溶隙，尤其发育不同形态的溶沟和溶洞，及岩溶塌陷等
2#溶沟	似半圆状	12.1	4.5	
3#岩溶塌陷坑	长条状	1.8	5.5	
4#岩溶塌陷坑	不规则漏斗状	4.6	4	
5#溶洞	似椭圆状	1.9	1	

解，因时间很短，溶蚀程度有限，多以分散、孤立状溶孔或铸模孔为主，发育微裂隙、溶隙(图 15-A)。

中期暴露：随着暴露时间的延长，在已发育的裂隙和溶隙基础上进一步溶蚀，产生了优势溶蚀通道，发生层面渗流，使通道周边部位溶蚀程度加强，形成长条形溶蚀通道(图 15-B)。

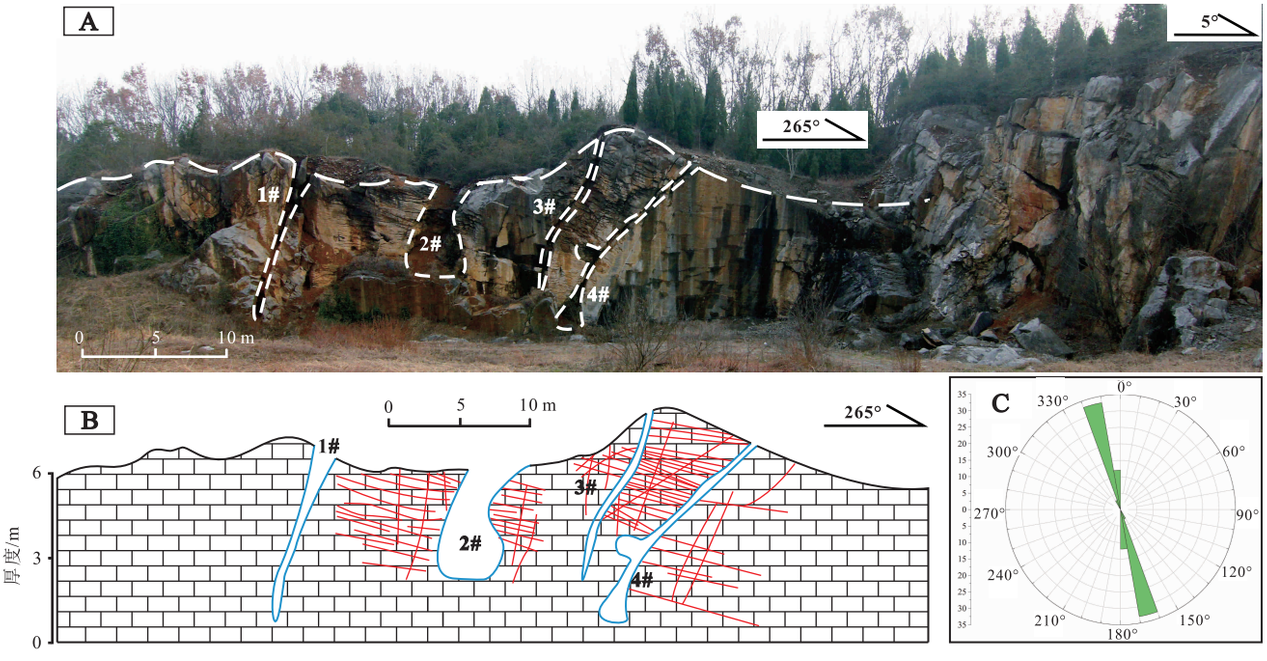
长期暴露：随着溶蚀通道进一步扩展，半固结岩石发生破碎，在重力作用下发生坍塌、破裂而形成不规则状半固结角砾岩(图 15-C)。

溶蚀充填覆盖期：长期溶蚀作用下所形成的岩溶角砾，随着海入侵作用开始，将溶蚀通道充填，形成白云质角砾岩，后被马家沟组白云岩所覆盖。(图 15-D)。

4.2　后生岩溶演化过程

4.2.1　层间岩溶演化过程

在早奥陶世早期，整个华北地区发生抬升及拉



A—徐庄组岩溶塌陷照片；B—徐庄组岩溶塌陷素描图；C—裂隙走向玫瑰花图

图 13 淮南舜耕山寒武系徐庄组岩溶塌陷地质剖面

Fig. 13 Karst collapse geological section of the Cambrian Xuzhuang Formation in Shungeng mountain, Huainan



A—生物碎屑灰岩；B—球藻灰岩；C—生物碎屑灰岩，裂隙发育，被结晶的方解石脉充填

图 14 淮南舜耕山寒武系徐庄组生物灰岩显微结构特征

Fig. 14 Microstructure characteristics of biological limestone in the Cambrian Xuzhuang Formation in Shungeng mountain, Huainan

张作用，并经历了长达 150 Ma 沉积间断期（Zhang *et al.*, 2021b; Chen *et al.*, 2022）。古大气降水不仅产生地表径流，同时也向下产生地下水流入渗作用，并沿着沉积层面发生了层间差异溶蚀作用，并形成层间岩溶化过程（杨婷婷等，2024），形成过程分为 2 个阶段。

1）垂向岩溶发育阶段：加里东运动抬升作用使奥陶系碳酸盐岩长期暴露于地表，处在一个表生风化剥蚀环境，沿着垂向裂隙经历了大气降水淋溶作用，从最初的奥陶系马家沟组地表径流和垂向入渗作用，到后期萧县组上部发育有裂隙、溶隙、溶孔、小洞穴等（图 16-A）。

2）层间岩溶发育阶段：随着地下水流作用不断加强，沿着岩层间发生差异性溶蚀作用，地下水流由垂向流转为水平层间紊流，从开始的溶蚀作用，转向层间冲刷作用，并携带不同粒径的岩屑流入层间，同时发生堆积和滞留。随着溶蚀作用进一步加强，在形成的大岩溶洞穴中发生坍塌、垮落等，形成不同形态的角砾岩（图 4；图 16-B）。

4.2.2 构造岩溶演化过程

区内构造岩溶以九龙岗为代表（图 6；图 7），受燕山多期构造地质运动影响，演化过程分为 3 个阶段。

1）深部裂隙孕育阶段（Ⅰ）：从印支运动到

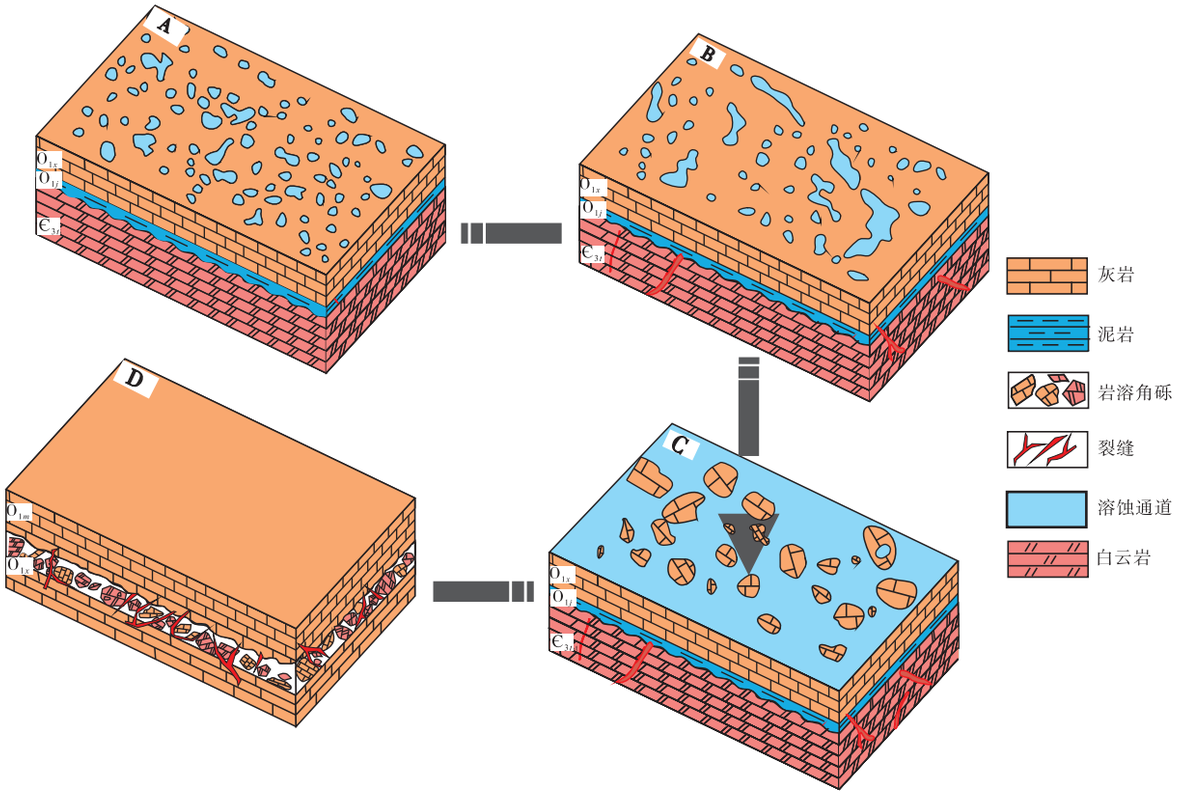


图 15　淮南舜耕山下古生界沉积岩溶形成与演化过程

Fig. 15　Formation and evolution process of the Lower Paleozoic sedimentary karst in Shungeng mountain, Huainan

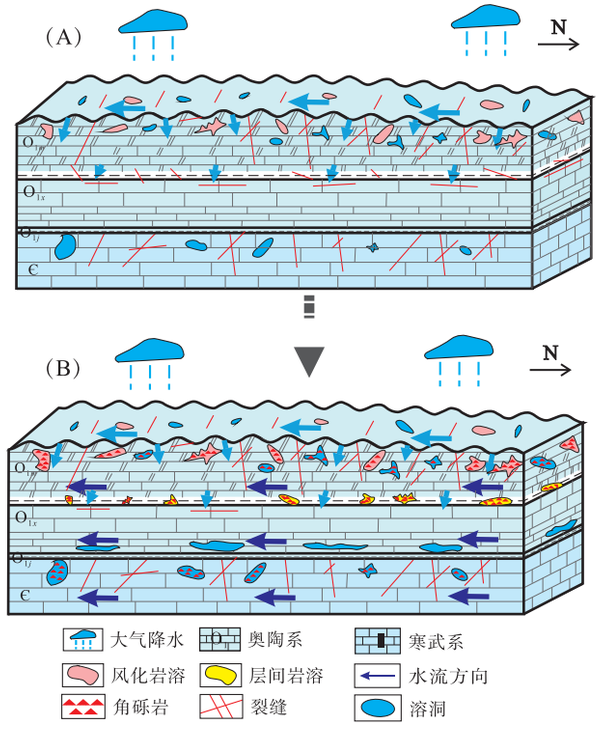


图 16　淮南舜耕山下古生界层间岩溶形成和演化过程

Fig. 16　Formation and evolution process of interlayer karst in the Lower Paleozoic strata in Shungeng mountain, Huainan

燕山运动，区内构造应力场由先前的挤压转为拉张状态，在地层深部形成非均质裂隙带(图 17-A)。

2）深部裂隙扩张和角砾孕育阶段（Ⅱ）：随着燕山运动加强和拉张作用持续，裂隙由深部向浅部不断扩大，形成一定宽度拉张破裂带，所产生的破碎岩屑呈棱角状，岩屑颗粒间隙发生高温和高压溶蚀作用，形成了新溶孔、溶隙和溶腔等，并被多次结晶所充填(图 17-B)。

3）构造岩溶形成阶段（Ⅲ）：随着拉张作用持续加强，其范围不断增大，垂向上延伸至地表，同时伴随着深部热液活动，高温、高压的水热流体及气体沿岩溶裂缝不断向上运移，与大气降水形成了混合溶蚀作用，并伴随有铁质浸染，颗粒间为方解石胶结，形成岩溶角砾岩(图 17-C)。

4.3 现代岩溶演化过程

自喜马拉雅运动以来，研究区岩溶发育程度不仅受岩性、构造和水文地质条件等影响，而且具有一定继承性，形成了现代岩溶，按其成因，分为 2 类。

1）重力滑塌引起岩溶塌陷演化过程：在寒武系、奥陶系露头覆盖和植被生长区，如图 13，大气降水除了产生地面径流外，主要以垂向入渗方式发生地下径流作用。随着长期降水入渗和溶蚀作用，在层面裂隙和构造裂隙发育交汇部位，形成表生岩溶作用，在裂隙发育集中地段，形成了包气带强径流带，并携带第四系沉积物进入其中。当岩土体原始平衡被破坏后，造成上覆岩土层的失稳，形成岩溶崩塌(图 18-A)。

2）潜蚀塌陷演化过程：在研究区内寒武系地层，如图 9，坍塌主要发育在可溶性碳酸盐岩和非可溶性泥岩或灰质泥岩之间，前者主要由生物碎屑灰岩、豆粒灰岩和藻灰岩组成，具有较强可溶性。在倾斜碳酸盐岩裸露区，长期大气降水沿斜坡发生垂向入渗，并通过岩溶裂隙产生水平径流，最后在可溶和非可溶界面附近，产生较强的地下水潜蚀作用，再加上与层面相交、裂隙发育，在溶隙网络交汇处，发生潜蚀垮塌(图 18-B)。

5 结论

通过对淮南舜耕山下古生界多种类型岩溶调查与分析表明，它的发育除了与岩石等物质基础有关外，还与后期地质构造、地表与地下水流作用等密切相关，代表了中国华北板块南缘岩溶发育特征和演化过程。

1）依据岩溶发育时间，下古生界岩溶可分为沉积岩溶、后生岩溶和现代岩溶 3 种类型。

2）不同时期不同类型岩溶角砾，是反映同生期、后生期和构造期等岩溶形成与演化过程重要标

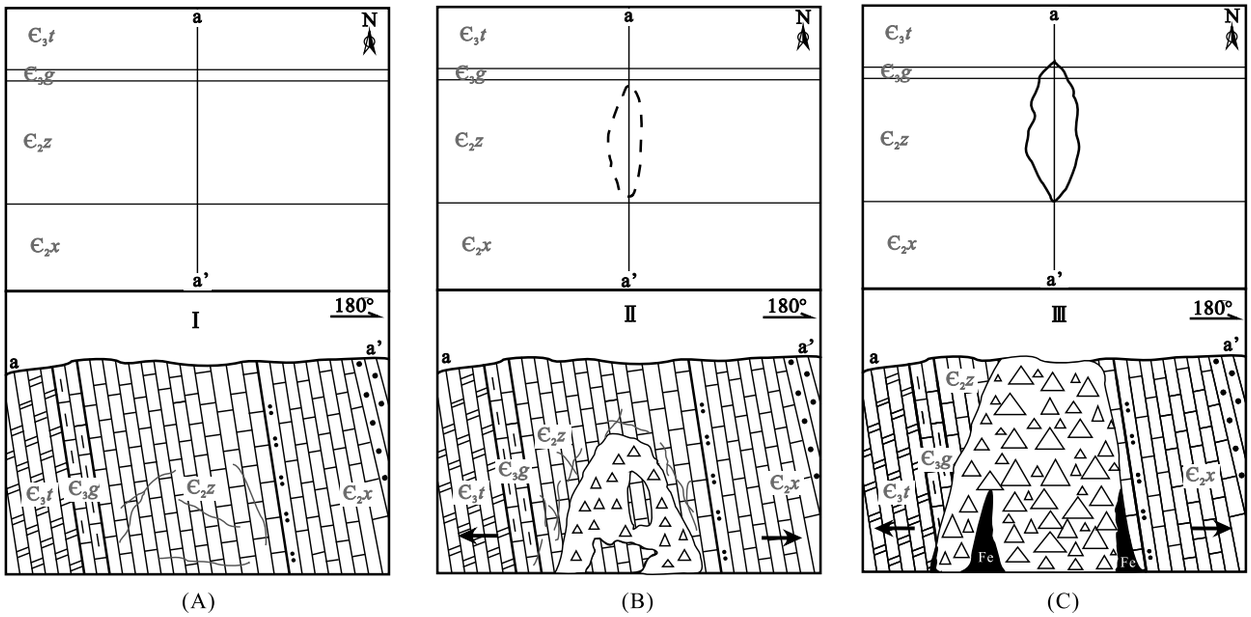
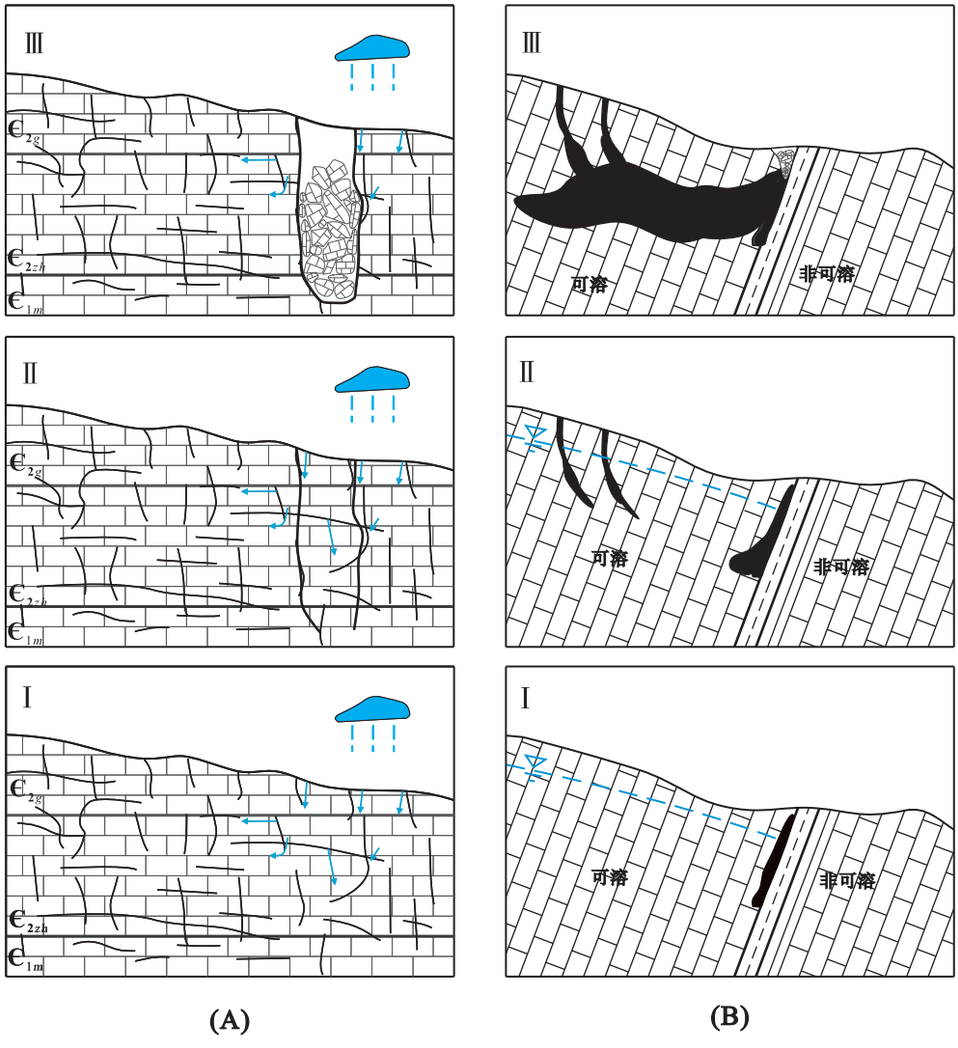


图 17 淮南舜耕山下古生界构造岩溶演化过程

Fig. 17 Tectonic karst evolution process of the Lower Paleozoic in Shungeng mountain, Huainan



A—重力滑塌形成岩溶塌陷过程；B—潜蚀塌陷形成过程

图 18　淮南舜耕山下古生界不同类型岩溶塌陷演化过程

Fig. 18　Evolution process of different types of karst collapse in the Lower Paleozoic of Shungeng Mountain in Huainan

志；现代岩溶主要以溶隙、溶沟、岩溶崩塌等为特征。

3）同生岩溶角砾岩形成于沉积间断期，由古大气降水及海水溶蚀作用而成；后生岩溶角砾为加里东运动抬升后，奥陶系碳酸盐岩经风化剥蚀、溶蚀和坍塌作用，为层间岩溶形成的产物；构造带角砾岩溶为燕山期断裂拉张形成，受地下深部热液作用所致；现代溶沟、塌陷是在层面裂隙与构造裂隙交汇处，由长期大气降水溶蚀及重力垮塌或潜蚀等作用形成。

4）系统研究总结裸露区不同类型岩溶发育特征及演化过程，为中国华北煤田隐伏区深部煤炭开采过程中的下古生界岩溶水害形成机制的客观认识和预防提供重要依据。

参考文献(References)

程广琪，刘登宪，傅先杰，王峻莺. 2013. 淮南煤田北西向断裂与岩溶陷落柱关系研究. 煤炭科学技术，41(10)：108-111. [Cheng G Q，Liu D X，Fu X J，Wang J Y. 2013. Study on relationship between northwest directional failure and Karst sinkhole in Huainan Coalfield. Coal Science and Technology，41(10)：108-111]

程鑫，操应长，远光辉，王艳忠，昝念民. 2020. 东营凹陷平方王—平南潜山下古生界碳酸盐岩储层成因及分布模式. 中国石油大学学报(自然科学版)，44(3)：1-14. [Cheng X，Cao Y C，Yuan G H，Wang Y Z，Zan N M. 2020. Origin and distribution model of the lower Paleozoic carbonate reservoirs in Pingfangwang-Pingnan buried

hills, Dongying Sag. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 44(3): 1-14]

甘林堂. 2018. 淮南矿区 A 组煤底板灰岩水防治及潘二矿突水事故原因分析. 煤矿安全, 49(7): 171-174, 180. [Gan L T. 2018. Prevention of limestone water in coal floor of group A of Huainan mining area and causes analysis of water inrush accidents in pan'er mine. Safety in Coal Mines, 49(7): 171-174, 180]

管笛. 2021. 张谢矿区岩溶陷落柱发育特征及形成机理探讨. 安徽理工大学硕士学位论文. [Guan D. 2021. Discussion on development characteristics and formation mechanism of Karst collapse column in Zhangxie mining area. Masteral dissertation of Anhui University of Science & Technology]

郝金月, 冉凤琴, 多吉, 唐菊兴, 杨宗耀, 吴鑫, 杨昕, 宋壮壮. 2021. 西藏斯弄多银多金属矿床热液角砾岩特征及成因分析. 矿床地质, 40(3): 509-522. [Hao J Y, Ran F Q, Duo J, Tang J X, Yang Z Y, Wu X, Yang X, Song Z Z. 2021. Characteristics and genesis of hydrothermal breccias in Sinongduo Ag polymetallic deposit, Tibet. Mineral Deposits, 40(3): 509-522]

虎维岳. 2010. 华北东部深部岩溶及煤矿岩溶水害特征. 煤田地质与勘探, 38(2): 23-27. [Hu W Y. 2010. The characteristics of Karst and deep coal mine Karst water hazards in eastern North China. Coal Geology & Exploration, 38(2): 23-27]

黎志豪, 许光泉, 高加林, 张海涛, 杨婷婷. 2018. 安徽淮南舜耕山岩溶发育特征及其塌陷模式. 中国地质灾害与防治学报, 29(2): 86-93. [Li Z H, Xu G Q, Gao J L, Zhang H T, Yang T T. 2018. Characteristics of Karst development and collapse mechanism in Shungeng Mountain, Huainan, Anhui Province. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 29(2): 86-93]

李文厚, 张倩, 陈强, 李克永, 郭艳琴, 袁珍, 马瑶, 李兆雨, 白金莉, 杨博. 2020. 鄂尔多斯盆地及周缘地区早古生代沉积演化. 西北大学学报(自然科学版), 50(3): 456-479. [Li W H, Zhang Q, Chen Q, Li K Y, Guo Y Q, Yuan Z, Ma Y, Li Z Y, Bai J L, Yang B. 2020. Sedimentary evolution of Early Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent Areas. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 50(3): 456-479]

李小明, 朱丽, 李永军, 杨希培. 2010. 淮南矿区岩溶发育特征及其富水规律. 华北科技学院学报, 7(1): 8-11, 22. [Li X M, Zhu L, Li Y J, Yang X P. 2010. The Karst development characteristic and the water abundance regular in Huainan mine area. Journal of North China Institute of Science and Technology, 7(1): 8-11, 22]

刘波, 肖红飞. 2019. 隧道下伏溶洞顶板安全厚度确定方法. 中国安全科学学报, 29(4): 104-111. [Liu B, Xiao H F. 2019. Method for determining safe thickness of cave roofs under a tunnel. China Safety Science Journal, 29(4): 104-111]

刘占国, 张永庶, 宋光永, 李森明, 龙国徽, 赵健, 朱超, 王艳清, 宫清顺, 夏志远. 2021. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制. 石油勘探与开发, 48(1): 68-80. [Liu Z G, Zhang Y S, Song G Y, Li S M, Long G H, Zhao J, Zhu C, Wang Y Q, Gong Q S, Xia Z Y. 2021. Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 48(1): 68-80]

邵红梅. 2015. 塔里木盆地古城地区下古生界白云岩储层特征及演化研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Shao H M. 2015. The Characteristic and Evolution of Early Paleozoic Dolomite Reservoir in Gucheng area of Terim Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]

王祯炜, 张朱亚. 1985. 淮南矿区岩溶发育及地下灰岩水径流特征. 煤田地质与勘探, 13(6): 32-35. [Wang Z W, Zhang Z Y. 1985. Characteristics of karst development and underground limestone water runoff in Huainan mining area. Coal Geology & Exploration, 13(6): 32-35]

吴金随, 张辞源, 尹尚先, 邢敏, 连会清. 2022. 近 20 a 中国煤矿水害事故统计及分析. 煤炭技术, 41(6): 86-89. [Wu J S, Zhang C Y, Yin S X, Xing M, Lian H Q. 2022. Statistics and analysis of coal mine water damage accidents in China in recent 20 years. Coal Technology, 41(6): 86-89]

武强, 董东林, 钱增江, 管恩太, 李树文, 潘国营. 2000. 试论华北型煤田立体充水地质结构理论. 水文地质工程地质, 27(2): 47-49. [Wu Q, Dong D L, Qian Z J, Guan E T, Li S W, Pan G Y. 2000. Discussion on the th-eory of three-dimensional water filling geological structure of North China type coalfield. Hydrogeology and Engineering Geology, 27(2): 47-49]

武雄, 高明显, 张顺峰, 孙燕冬, 管清花, 吴海燕. 2007. 枣庄岩溶塌陷形成条件及主要影响因素. 地学前缘, 14(6): 227-233. [Wu X, Gao M X, Zhang S F, Sun Y D, Guan Q H, Wu H Y. 2007. Analysis on forming conditions and main influential factors of Karst collapse in the area of Zaozhuang. Earth Science Frontiers, 14(6): 227-233]

徐斌, 祁荣荣, 尹尚先, 魏远, 连会青, 夏向学, 李书乾. 2023. 中国煤矿水害重特大事故相关因素特征分析及防治对策. 煤矿安全, 54(5): 13-19. [Xu B, Qi R R, Yin S X, Wei Y, Lian H Q, Xia X X, Li S Q. 2023. Characteristics analysis of correlation factors of coal mine water hazard accidents and prevention and control measures. Safety in Coal Mines, 54(5): 13-19]

许光泉, 沈慧珍. 2004. 疏降地下水引起地面塌陷浅析: 以淮南煤矿区为例. 中国地质灾害与防治学报, 15(4): 64-68. [Xu G Q, Shen H Z. 2004. Analysis on the land collapse induced by pumping groundwater: Huainan Coal Mine as an example. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 15(4): 64-68]

许光泉, 孙丰英, 刘丽红, 李佩全, 汪敏华, 刘满才. 2016. 淮南潘谢矿区岩溶类地质异常体演化过程及预测. 煤田地质与勘探, 44(1): 62-68. [Xu G Q, Sun F Y, Liu L H, Li P Q, Wang M H, Liu M C. 2016. Evolution process and prediction of karstic geologic abnormal bodies in Panxie coal mining area in Huainan. Coal Geology & Exploration, 44(1): 62-68]

许光泉, 张海涛, 周继生, 李旭, 汪敏华, 刘满才. 2022. 华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究综述及展望. 中国岩溶, 41(2): 259-275. [Xu G Q, Zhang H T, Zhou J S, Li X, Wang M H, Liu M C. 2022. A review and prospect of research on karst collapse columns and water

inrush in North China Coalfield. Carsologica Sinica, 41(2): 259-275]

闫伟. 2019. 冀中坳陷下古生界岩溶类型及岩溶模式研究. 中国石油大学(北京)博士论文. [Yan W. 2019. Study on Karst types and Karst models of lower Paleozoic in Jizhong depression. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing)]

杨婷婷,许光泉,何玉鹏,王凯,张著. 2024. 安徽淮南舜耕山奥陶系古溶洞发育特征及成因. 古地理学报,26(3): 620-631. [Yang T T, Xu G Q, He Y P, Wang K, Zhang Z. 2024. Developmental characteristics and form-ation of the Ordovician paleocaves in Shungeng mountain, Huainan of Anhui Province, China. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 26(3): 620-631]

袁道先,蒋勇军,沈立成,蒲俊兵,肖琼. 2016. 现代岩溶学. 北京: 科学出版社. [Yuan D X, Jiang Y J, Shen L C, Pu J B, Xiao Q. 2016. Modern Karstology. Beijing: Science Press]

詹润,张文永,窦新钊. 2017. 淮南煤田构造演化与煤系天然气成藏. 中国煤炭地质,29(10): 23-29. [Zhan R, Zhang W Y, Dou X Z. 2017. Tectonic evolution and coal measures natural gas reservoiring in Huainan Coalfield. Coal Geology of China, 29(10): 23-29]

张党育,蒋勤明,高春芳,王铁记,王玺瑞. 2020. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展. 煤炭科学技术,48(6): 31-36. [Zhang D Y, Jiang Q M, Gao C F, Wang T J, Wang X R. 2020. Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water damage control in the floor of North China Coalfield. Coal Science and Technology, 48(6): 31-36]

张海涛. 2021. 淮南煤田奥陶系古岩溶成因机理及预测研究. 安徽理工大学博士学位论文. [Zhang H T. 2021. Formation mechanism and prediction of Ordovician paleokarst in Huainan Coalfield. Doctoral dissertation of Anhui University of Science and Technology]

张泓,郑玉柱,郑高升,王绳祖. 2003. 安徽淮南煤田阜凤推覆体之下的伸展构造及其形成机制. 煤田地质与勘探,31(3): 1-4. [Zhang H, Zheng Y Z, Zheng G S, Wang S Z. 2003. Extensional structure under the Fufeng-nappe in Huainan Coalfield, Anhui Province, and its formative mechanism. Coal Geology & Exploration, 31(3): 1-4]

邹洋,彭立敏,张智勇,雷明峰,彭龙,施成华. 2021. 基于突变理论的岩溶隧道拱顶安全厚度分析与失稳预测. 铁道科学与工程学报,18(10): 2651-2659. [Zou Y, Peng L M, Zhang Z Y, Lei M F, Peng L, Shi C H. 2021. Safety thickness analysis and stability prediction of tunnel roof in karst region based on catastrophe theory. Journal of Railway Science and Engineering, 18(10): 2651-2659]

Chen L P, Zhang H, Cai Z X, Hao F, Xue Y F, Zhao W S. 2022. Petrographic, mineralogical and geochemical constraints on the fluid origin and multistage karstification of the Middle-Lower Ordovician carbonate reservoir, NW Tarim Basin, China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 208: 109561.

Fu Q L. 2019. Characterization and discrimination of paleokarst breccias and pseudobreccias in carbonate rocks: insight from Ordovician strata in the northern Tarim Basin, China. Sedimentary Geology, 382: 61-74.

Ni J L, Liu J L, Sun Y J, Shi X X, Li S. 2019. The characteristics of the structure, strain and kinematic vorticity of the Wulian detachment fault zone, Shandong Peninsula, China. Science China Earth Sciences, 62(9): 1399-1415.

Rehfisch M W, Webb J A. 1993. The Early Devonian coopers creek limestone: a deep-water redeposited limestone in the Melbourne trough, southeastern Australia. Australian Journal of Earth Sciences, 40: 575-589.

Yang X L, Xiao H B. 2016. Safety thickness analysis of tunnel floor in Karst region based on catastrophe theory. Journal of Central South University, 23(9): 2364-2372.

Zhang H T, Xu G Q, Liu M C, Wang M H. 2021a. Formation environments and mechanisms of multistage paleokarst of Ordovician carbonates in Southern North China Basin. Scientific Reports, 11: 819.

Zhang H T, Xu G Q, Zhan H B, Zheng J B, Wang M H, Liu M C, Pan S Q, Wang N. 2021b. Formation mechanisms of paleokarst and Karst collapse columns of the Middle Cambrian-Lower Ordovician carbonates in Huainan coalfield, Northern China. Journal of Hydrology, 601: 126634.

(责任编辑　李新坡; 英文审校　李　攀)