DOI:10. 16031/j. cnki. issn. 1003-8035. 2018. 02. 14

安徽淮南舜耕山岩溶发育特征及其塌陷模式

黎志豪,许光泉,高加林,张海涛,杨婷婷
(安徽理工大学,安徽 淮南 232001)

摘要: 舜耕山位于华北板块和下扬子板块的交汇处,是逆冲推覆构造下的产物,其岩溶现象较发育,本文以碳酸盐岩露头区和隐伏区为研究对象,通过对其岩溶调查,获得空间上的地层、岩性组合特征,及构造地质特征与岩溶发育特征,并归纳出本区岩溶塌陷的四种模式。结果发现:区内岩溶发育受多期构造地质运动与岩溶地下水流共同作用影响,露头区岩溶塌陷(溶洞)发育的位置多发生在二组或三组以上不同类型岩溶裂隙交汇处,或发生在可溶岩与非可溶岩接触面上,形成机制以重力崩塌和潜蚀为主。被第四系松散层覆盖的隐伏区,岩溶较发育,采矿疏放奥陶系灰岩地下水,以真空吸蚀作用,形成地面岩溶塌陷。

关键词: 舜耕山;岩溶特征;岩溶塌陷模式;形成机制
中图分类号: P642. 25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-8035(2018)02-0086-08

Characteristics of karst development and collapse mechanism in Shungeng Mountain, Huainan, Anhui Province

LI Zhihao, XU Guangquan, GAO Jialin, ZHANG Haitao, YANG Tingting
(*Anhui University of Science and Techology, Huainan, Anhui* 232001, *China*)

Abstract: Shungeng Mountain is located at the junction of the North China plate and the lower Yangtze plate, which is the product of the thrust nappe structure, and karst phenomenon is relatively developed. In this paper, through field investigation, the strata and lithology combination characteristics, the tectonic geological character as well as the developing feature of karst are obtained. The results show that the development of karst is affected by multi period tectonic movement and groundwater, karst collapse (caves) occurres in the interchange area of two or more than three groups of different types of karst fractures, or in the interface of karst and non karst, and the collpase mechanism was dominated by gravity and suffosion. The concealed areas, coverd by Quaternary loose layer, has a relatively karst development, mining drainage in Ordovician limestone groundwater forms surface karst collapse by vacuum erosion.

Keywords: Shungeng Mountain; karst characteristic; karst collapse model; formation mechanism

0 引言

舜耕山位于华北板块和华南板块的交汇处,它是逆冲推覆构造下产物,其碳酸盐形成过程中所经历的先期沉积作用[1-3]、后期的构造地质作用[4-6]以及形成过程中的水文地质作用[7-9]等,与华北板块内部相比,存在一定的区别。以往的岩溶形成机制及发育规律研究多集中在华北板块内部和西南岩溶塌陷地

收稿日期: 2017-09-12; **修订日期:** 2017-10-09
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572147);安徽理工大学研究生创新基金资助项目(2017CX2001)
第一作者: 黎志豪(1992-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事水文地质环境地质研究。E-mail:zhlee_aust@ qq. com
通讯作者: 许光泉(1967-),男,安徽六安人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文地质环境地质方面研究。E-mail:gqxu67@163. com

区[10-12]，板块接触碰撞边缘地带研究相对较少。

随着安徽淮南矿区经济发展，南部矿区隐伏煤层的持续开采，形成岩溶矿坑突水，导致了舜耕山露头区和北侧的大面积浅覆盖岩溶区岩溶塌陷时常发生，给当地居民的生活以及矿山生产带来安全隐患[13]，如何弄清区内岩溶发育特征及其影响因素，以及形成机制，从而有效地预防灾害发生，成为该区地质灾害防治工作重点，需亟待解决。

1　研究背景

1.1　地层与构造

舜耕山位于合肥盆地北部边缘，自三叠中统以来经历了印支运动、燕山、喜马拉雅及新构造等多期构造地质运动，使得不同时代的老地层向北覆于原地地层之上，不仅产生了近 EW 向的推覆体构造带，也产生了 NNE 和 SN 向的断裂构造。自东向西，从九龙岗—大通—洞山一带，寒武系和奥陶系地层出露较好，由南向北，发育裸露的寒武系、奥陶系地层，以及被第四系松散层所覆盖的石炭系和二叠系和三叠系地层，岩层走向近东西，倾向向南倒转。受构造挤压力不均影响，从九龙岗至洞山，地层倾角由直立状，逐渐变缓为 60°，从洞山至泉山湖一带，地层倾角变为 20°。除了寒武系、奥陶系地层发育外，隐伏的石炭和二叠系夹片地层变薄；在泉山湖至罗山一带，出露太古界、地青白口系、震旦系和三叠系等地层。从岩性和构造角度，可将舜耕山东西划分为两个不同块段，即九龙岗－泉山块段和罗山块段，块段之间以断层进行接触；从南向北，由阜李正断层、舜耕山逆断层组形成的两个推覆块段，其中舜耕山断层组形成的 C－P 夹片由九龙岗至罗山，逐渐变薄，最终在罗山一带收敛。另外，受推覆构造和块段之间的平移错动的共同影响，寒武系和奥陶系地层各组在泉山水库附近的庙山不同程度变薄（图 1）。

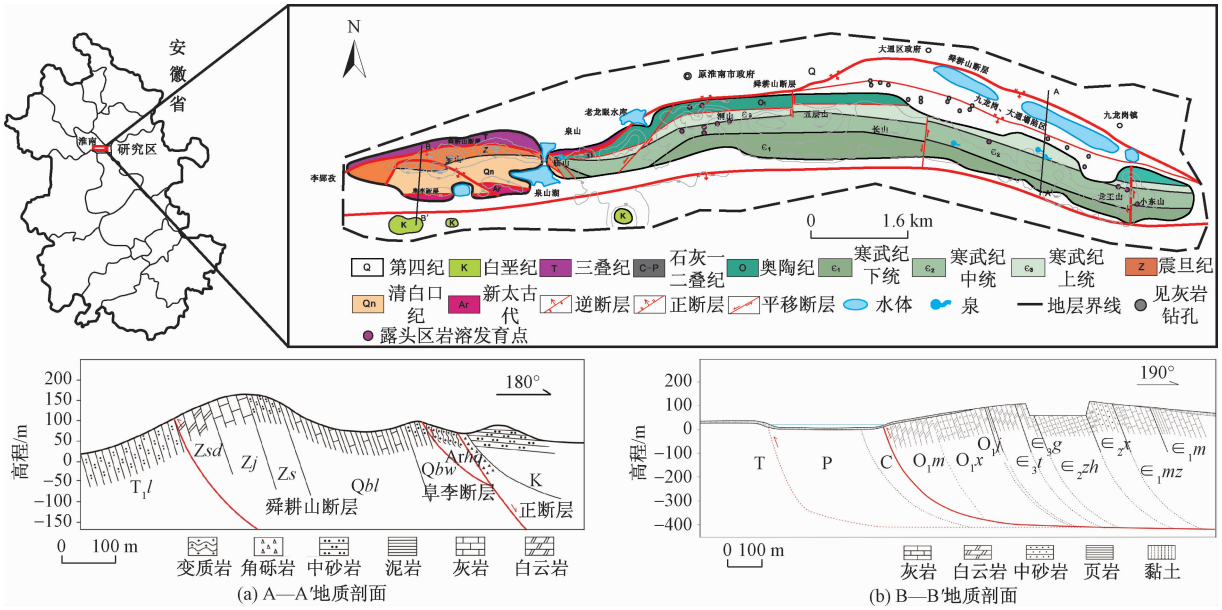

图 1　舜耕山地区地质图

Fig. 1　Comprehensive geological map of Shungeng Mountain

1.2　水文地质特征

地下水赋存状态不仅受岩层和岩性控制，同时更受构造地质条件制约。依此，将本区地下水划分为四大类型：第四系松散岩类孔隙水、碎屑岩类砂岩裂隙水、碳酸岩类裂隙岩溶水、其他岩类孔隙－裂隙水（图 2）。其中寒武－奥陶系地层在舜耕山一带分布广泛，寒武系以灰岩为主，主要出露在舜耕山脊以南，厚度在 700～1 200 m，露头区裂隙、溶隙发育，接受大气降水垂向入渗补给，其富水性强，在寒武系的馒头组和毛庄组泥岩段受到了阻隔作用后，往往在此形成间歇泉。奥陶系出露在舜耕山的北坡，厚度 200～500 m，主要以白云岩和灰质白云岩为主，其次为灰岩，野外调查和钻探揭露表明，其溶蚀程度强烈，受岩性、构造及水流侵蚀作用共同影响，溶洞面高低不平。在寒武系地层中，沿碳酸盐地层走向上，在灰岩与泥岩的层间裂隙上，因泥岩层的阻隔作用，有明显条带状分布潜蚀溶洞。

本区岩溶地下水补给源主要来自大气降水和地表水入渗。在岩溶裸露区，主要通过溶沟、溶槽以及溶洞

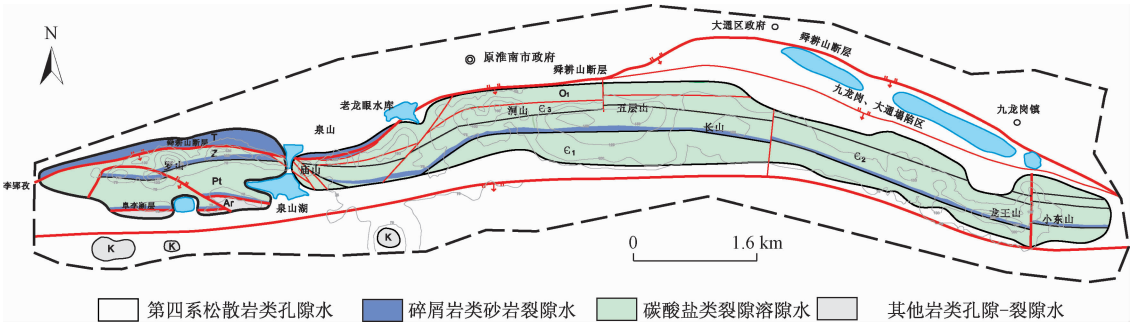

图 2 舜耕山地区地下水类型分类图

Fig. 2 Classifications and distribution of groundwater in Shungeng Mountain

等通道,垂直入渗到下部岩溶含水层,并发生侧向流动;在岩溶覆盖区,大气降水通过第四系松散层垂向下补给岩溶水。地下水排泄受地形控制,由地形高处向低处径流,最后在地层低洼处以泉或散流形式排泄,或在断裂破碎带处出现泉。

1.3 碳酸盐岩分布状况

碳酸盐岩在区内分布较广,依据地层露头和埋藏条件的不同,将其分为埋藏型岩溶、覆盖型岩溶、裸露型岩溶以及非岩溶这四大类[14](图 3)。其中埋藏型岩溶区为碳酸岩顶部有厚度超过 5 m 的非均一性的土体覆盖,分布在舜耕山两翼山前区域;覆盖型岩溶主要为第四系的坡积物和植被所覆盖,厚度一般在 1 ~ 5 m,在舜耕山北麓分布;裸露型岩溶指碳酸盐岩出露于地表或其局部覆土厚度小于 1 m 的区域,其范围基本包含整个舜耕山山脉;非岩溶主要为二叠系和三叠系的紫红色砂岩,为裂隙发育区。分布情况如图 3 所示。

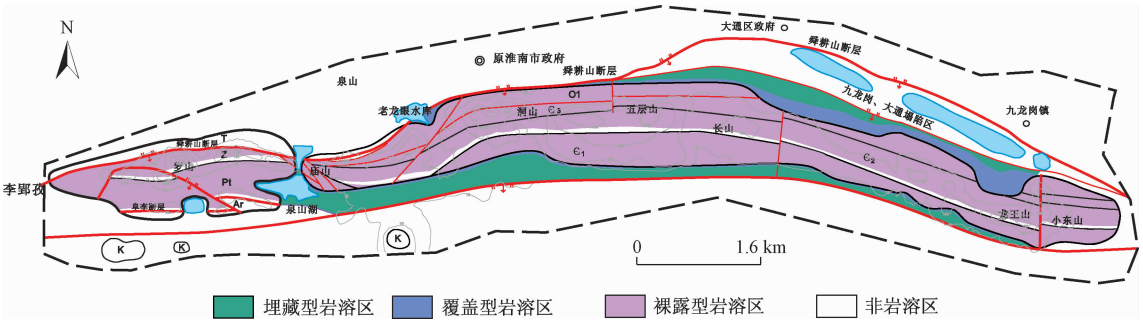

图 3 舜耕山地区岩溶类型分区图

Fig. 3 Partition map of different karst types in Shunggeng Mountain

2 岩溶发育特征

2.1 露头区岩溶特征

岩溶角砾的出现是本区古岩溶最直观的标志之一,调查中发现,区内岩溶角砾按其成因,可分为原始沉积和后期构造作用形成。其中,前者镶嵌结构岩溶角砾,可细分为角砾支撑的岩溶角砾、角砾支撑基质填隙的岩溶角砾二种类型,多发育在马家沟组地层中,其表现为沿岩溶缝隙原地溶蚀和垮塌的角砾(图 4(a)、(b)、(d))。而后期构造形成的岩溶裂隙带内,往往形成方解石脉体充填复成分岩溶角砾岩(图 4(c)),多发育在张夏组近南北向的张裂隙中,角砾大小在3 ~ 80 cm 不等,其形成大多是裂隙充填物垮塌形成角砾杂乱堆积,微观结构见图 4(e),4(f)。

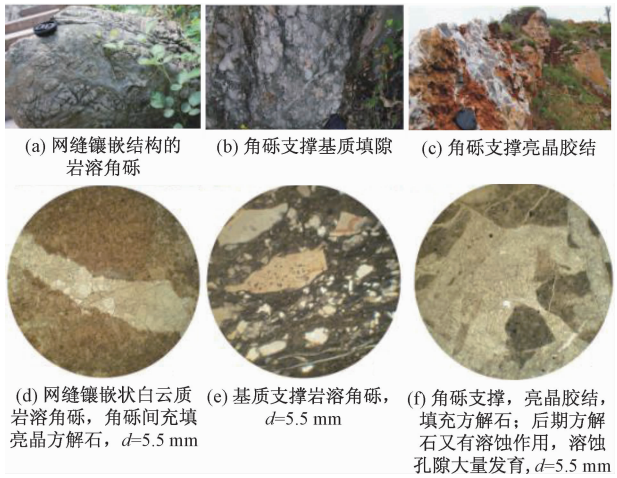

图 4 岩溶角砾宏观和微观照片

Fig. 4 Macroscopic and microscopic photographs of karst breccia

通过野外调查显示,露头区岩溶发育且形态各异,其中溶沟、溶逢形态的岩溶主要沿可溶性裂隙面发育,经过溶蚀和冲蚀作用,以沟状、漏斗状以及其他形态与地层垂直和斜交,向深部变缓;溶洞大都充填第四系松散沉积厚层黏土,岩溶塌陷(溶洞)发育的位置多发生在二组或三组以上不同类型岩溶裂隙交汇处,或发生在可溶岩与非可溶岩接触面上;岩溶发育层位主要集中在馒头组、毛庄组、张夏组、崮山组以及马家沟组等地层中(图 5、表 1)。

2.2　隐伏区岩溶特征

舜耕山隐伏区岩溶多发育在马家沟组地层中(图 6),在九龙岗、大通矿井钻孔资料中均有揭露(表 2),在奥灰段,地面有 7 个孔实际揭露溶洞总高度46.3 m,遇溶洞 33 个,其中揭露最大高度在九龙岗沈家岗为 8.32 m,在大通老龙窝问为 4.51 m。溶洞率为 1.4% ~20.9%。奥灰岩溶发育沿走向主要分布在九

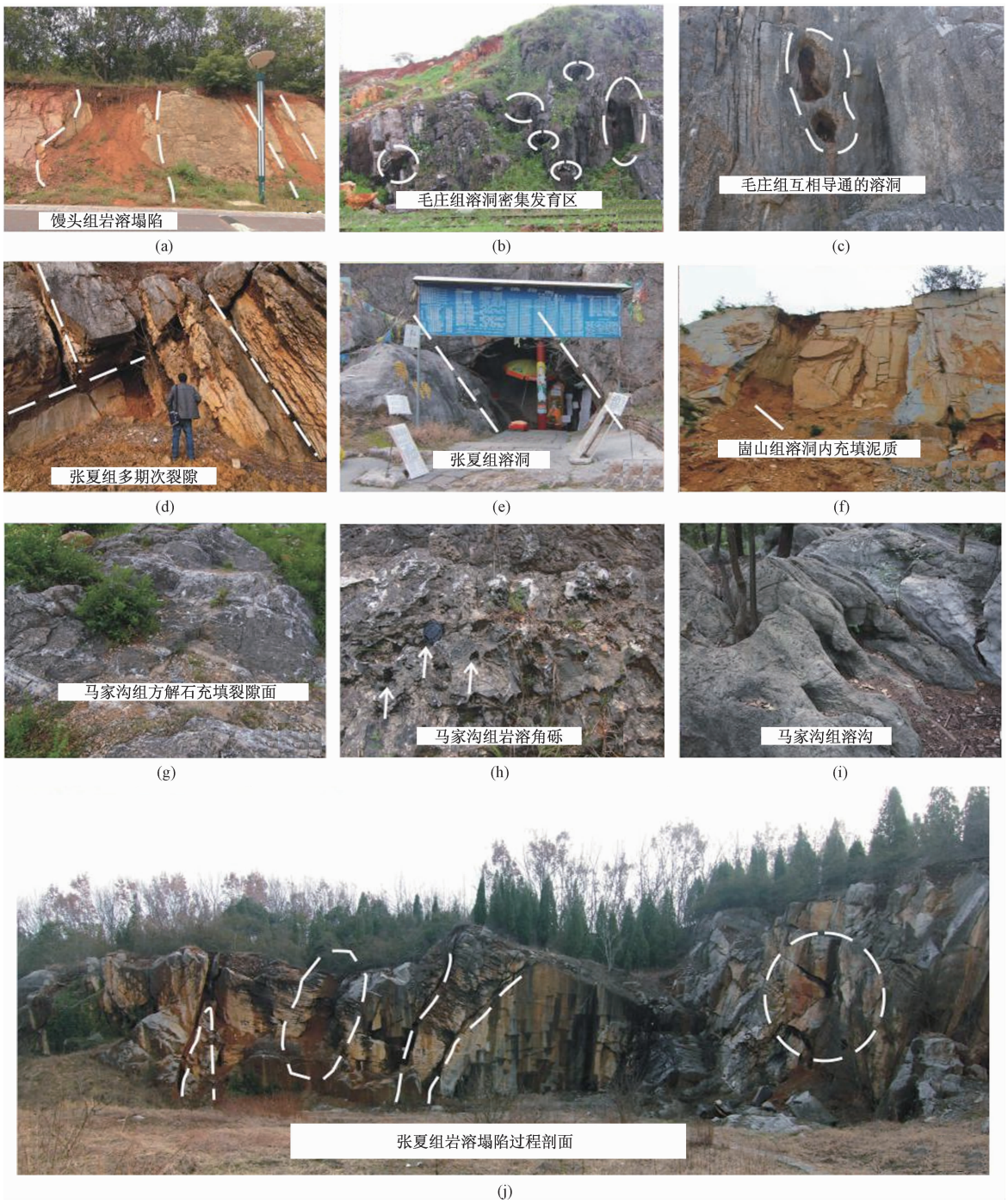

图 5　舜耕山地区岩溶发育层位

Fig. 5　Karst development horizon in Shungeng Mountain

表 1 舜耕山地区主要岩溶发育层位及特征

Table 1 Karst development strata and characteristics in Shungeng Mountain area

发育层位	岩性组成	岩溶发育情况
馒头组	下段为页岩,中段以豹皮灰岩、含白云质灰岩为主,上段为页岩与中薄层灰岩互层	发育小型或中型溶洞,沿非可溶岩界面发育,图 5(a)
毛庄组	白云质灰岩夹粉砂质页岩	溶蚀作用使得岩体整体岩溶化,发育多而较为密集的小型溶洞,图 5(b)、(c)
张夏组	厚层状灰岩,鲕状灰质为主	沿层面裂隙以及构造破碎带发育较大规模的溶洞和岩溶通道,图 5(d)、(e)、(j)
崮山组	下段岩性为灰、黄灰色中厚层鲕状含白云质灰岩,上段为含硅质灰质白云岩与页状泥质白云岩互层	溶洞发育规模较大,沿非可溶岩界面发育,图 5(f)
马家沟组	下段为褐灰色豹皮状灰质白云岩,上段为灰、灰褐色厚层白云岩、灰质白云岩	以溶沟、溶缝的形态发育,溶缝大都被方解石充填,岩溶角砾发育,图 5(g)、(h)、(i)

大井田两端,在垂向上由浅入深岩溶发育有相对减弱的趋势。

隐伏区的岩溶塌陷特征主要表现为两种情况,一种是与地层走向近垂直与斜交的岩溶塌陷坑,这是由于奥灰浅部岩溶极为发育,再加上排洪沟,造成岩溶塌陷频繁发生。第二种情况是与地层走向平行的潜蚀带,均分布在奥灰地层上方,并具有区段性,它的形成是由于顶板岩石倾倒,在露头产生岩石倒坎形状的张裂缝,再加上矿山排水,致使地下水的坡度和速度增大,将洞穴中细颗粒的沉积物带走,地面便下沉,以潜蚀带的形式显现。

3 岩溶发育模式及形成机理

3.1 岩溶发育模式

通过对比分析舜耕山地区岩溶塌陷区的地质结构以及埋藏特点,根据岩溶塌陷所受的构造运动以及地下水运动的影响,建立了四种岩溶塌陷模式(图 7)。

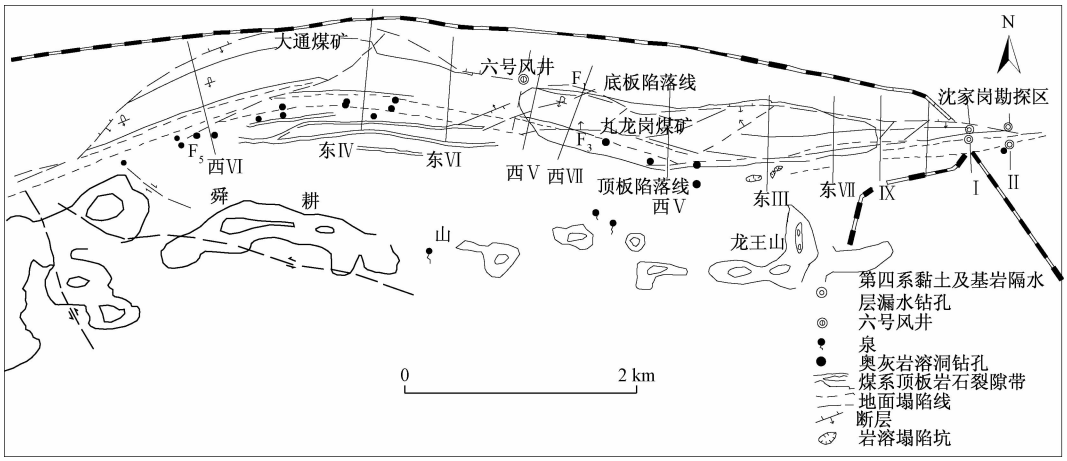

图 6 九龙岗 - 大通井田隐伏岩溶区调查

Fig. 6 Survey of concealed karst area in Jiulong and Datong Mine Fields

表 2 九龙岗 - 大通隐伏区溶洞情况统计

Table 2 Statistics of karst caves in Jiulonggang and Datong Mine

井田	位置	孔号	钻孔倾角/(°)	终孔深度/m	溶洞层位	揭露灰岩厚度/m	遇溶洞高度/m	溶洞率/%	溶洞个数	最高溶洞
大通	西VII线	56 - 大水 - 02	90	104.43	奥灰	93.09	19.42	20.9	12	4.51
	西VII线	53 - 大 - 02	60	245.58	太灰					0.3
	老坝沟	54 - 大水 08		287.1	奥灰	234.61	3.79	1.6	3	2.04
	老坝沟	53 - 007		137.56	奥灰				大于 10 个	1.36
九龙岗	西VI线	56 - 九 - 06	70	227.21	奥灰	74.57	1.37	1.8	1	1.37
	西III线	56 - 建 - 08	63	139.37	奥灰	77.47	2	2.6	1	2
	重华村西	56 - 九 - 09	90	150.36	奥灰	143.63	1.99	1.4	3	1.53
	西半线	56 - 建 - 12	70	162.52	奥灰	35.31	2.73	7.6	3	1.88
	沈家岗	56 - 九沈水 - 03	90	150.01	奥灰	125.04	15	12	10	8.32

(1)构造裂隙引起的重力致塌:该模式地质基础主要由较为纯净的灰岩组成的一元结构,主要分布在舜耕山脉寒武系张夏组地层中,其岩性受构造运动的影响,岩体内部裂隙发育,裂隙发育并呈一定的方

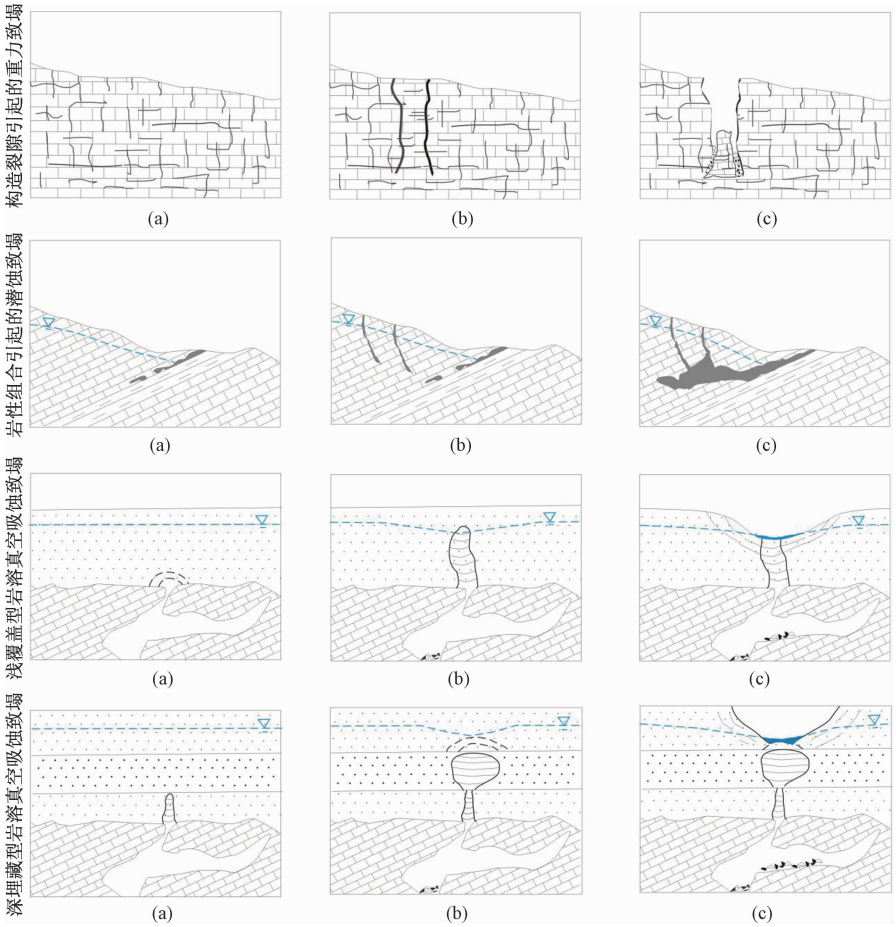

图 7　不同埋藏条件下岩溶塌陷发育模式

Fig. 7　Development model of karst collapse under different burial conditions

向性。

(2)岩性组合引起的潜蚀致塌:该模式是碳酸盐岩地层中发育一层或多层非可溶岩地层的二元组合结构,指示可溶岩与非可溶岩贴合处发生的塌陷,多发育在舜耕山寒武系馒头组以及崮山组地层中。

(3)浅覆盖型岩溶真空吸蚀致塌:该模式即基底为碳酸盐岩,上覆为厚度小于 5 m 的亚黏土或亚砂土地层覆盖的二元结构,指示岩溶浅覆盖区塌陷,其分布范围主要在舜耕山北坡山前一带。

(4)深埋藏型岩溶真空吸蚀致塌:该模式即基底为碳酸盐岩,上覆为厚度大于 5 m 的多层土层(黏土、砂土、亚黏土、亚砂土)覆盖的多元结构组成,指示岩溶深埋藏区塌陷,主要分布在舜耕山以南区域。

3.2　岩溶形成机制

(1)构造裂隙引起的重力致塌,该模式形成的塌陷主要受构造控制,经过印支至新构造运动后,基岩裂隙和孔隙发育,据统计主要裂隙发育可分为三组,其中倾向为 NNW 以及 SSE 的两组裂隙发育导通地表,随后大气降水通过导通地表的裂隙以及倾向为 NNE 的张裂隙向下入渗,经过不断的冲刷和淘蚀,底部岩体破碎,无法支撑上部荷载,上部岩体失稳,发生重力崩塌,见图 5(j)。

(2)岩性组合引起的潜蚀致塌,该种塌陷模式主要受岩性组合和地形地貌的控制,裸露的碳酸盐岩直接接受大气降水的垂向补给,地下水由水头高向水头低处流动,并在与非可溶岩接触面(或阻水断层附近)排泄,使得非可溶岩与可溶岩接触面区域岩溶发育,同时与岩层斜交或近于垂直的溶缝、溶沟在地下水渗流溶蚀以及岩溶地貌影响在岩溶坡地上不断发育,之后非在可溶岩与可溶岩贴合面处的岩溶受地下水的控制开始水平淘蚀,形成潜蚀带,当暴雨季节来临,地下水的坡度和流速增大,带走潜蚀带里的细粒充填物,导通地表的溶沟或溶洞就容易发生塌陷,见图 5(f)。

(3)浅覆盖型岩溶真空吸蚀致塌,舜耕山地区岩溶塌陷形成机理以该模式为主。该区域地层厚度在 1 ~ 5 m,土层以亚黏土为主,局部地段为亚黏土和亚砂

土的多元结构,下伏地层以奥陶系灰岩为主的基岩面。塌陷多发生在本区,地下水位在基岩面上下波动,由于上覆地层为亚黏土,具有较好的密封性,使得岩溶水位的变化在岩溶腔体内形成负压,对岩溶洞口顶板的土体产生真空吸蚀的力学性质,土层发生破坏形成早期的土洞[15],随着地下水位的波动,降水入渗以及震动影响,使得土洞周围不断垮塌以及裂隙不断向上扩张,支撑力逐渐减小,当土洞顶板受力达到支撑上覆土体的重量的极限时时便会垮塌,在地面形成塌陷坑。

(4)深埋藏型岩溶真空吸蚀致塌,舜耕山脉以北一带岩溶塌陷形成机理为该种类型。塌陷区覆土厚度一般大于 5 m,下伏地层为奥陶系灰岩,内部溶洞发育,由于埋藏较深一般塌陷不发育到地表,但由于九龙岗、大通两个矿区采煤疏放岩溶水的影响,使得水位迅速下降,适逢雨季时,大气降水又通过碳酸盐岩露头区以及岩溶通道补给埋藏较深的碳酸盐岩,水位快速上升,矿山又继续加强排水,地下水位如此反复的波动,造成岩溶洞穴顶部上的土洞不断扩大,土洞边壁慢慢垮塌并向上延展,当土洞发展一定程度,导通第四系含水层下渗补给岩溶通道时,上覆地表土体在地下水作用下发生崩塌,地面塌陷坑形成。

4 结论

(1)舜耕山地区岩溶发育,在露头区多发育在毛庄组、张夏组、崮山组以及马家沟组地层中,受构造断裂以及地下水流控制,尤其是在组内可溶岩与非可溶岩贴合面并且有地下水排泄点附近,岩溶极为发育。隐伏区岩溶多发育在奥陶系地层中,钻孔揭露的溶洞率最高达 20.9%,发育规律在水平方向呈条带性,垂向上分层的特点,溶洞向深部逐渐减少。

(2)舜耕山岩溶塌陷模式按露头区和隐伏区,可分为四种发育模式,其中露头区岩溶发育的致塌模式有两种,一种主要受构造断裂控制以重力崩塌形成的塌陷机制,还有一种主要受地层岩性组合控制,在可溶岩与非可溶岩贴合面以潜蚀为主的塌陷机制;隐伏区岩溶发育也分为两类,一类为潜覆盖岩溶发育模式,其形成机理为潜蚀与真空吸蚀形结合的方式致塌,一类为深埋藏型岩溶发育模式,主要是采矿疏排水致使地下水位波动引发真空吸蚀致的塌为主。

参考文献:

[1] 杨欣德,史晓颖.中朝地台南部下、中寒武统层序地层特征[J]. 现代地质,2000,14(1):9 - 14.
YANG Xinde, SHI Xiaoying. Sequence features of the lower-middle Cambrian in the southern sino-korea platform[J]. Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences, 2000, 14 (1): 9 - 14.

[2] 史晓颖, 陈建强, 梅仕龙.华北地台东部寒武系层序地层年代格架[J].地学前缘, 1997(Z2):161 - 173.
SHI Xiaoyin, CHEN Jianqiang, MEI Shilong. Cambrian sequence chronostratigraphic frame work of the North China platform[J]. Earth Science Frontiers, 1997(Z2):161 - 173.

[3] 时国.南华北地区奥陶系层序地层与层序格架内古岩溶研究[D].成都:成都理工大学,2010.
SHI Guo. Study on sequence stratigraphy and palaeokarst characteristics within sequence stratigraphic framework of Ordovician around Southern North China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2010.

[4] 曹代勇,高文泰.华北聚煤区南缘(豫皖)逆冲推覆构造带[J].中国矿业大学学报,1991(1):28 - 35.
CAO Daiyong, GAO Wentai. The thrust and nappe tectonics zone along the boundary of coal accumulation of north China [J]. Journal of China University of Mining and Technology,1991(1):28 - 35.

[5] 姜波.淮南煤田逆冲叠瓦扇构造系统[J].煤田地质与勘探,1993(6):12 - 17.
JIANG Bo. Thrust imbricate fan tectonic system in Huainan coalfield[J]. Coal Geology and Exploration, 1993(6):12 - 17.

[6] 宋传中,朱光,刘国生,等.淮南煤田的构造厘定及动力学控制[J].煤田地质与勘探,2005,33(1):11 - 15.
SONG Chuanzhong,ZHU Guang,LIU Guosheng,et al. Identificating of structure and its dynamics control of Huainan coalfield[J]. Coal Geology and Exploration, 2005,33(1):11 - 15.

[7] 袁杰,高宗军,马海会.论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4):95 - 98.
YUAN Jie, GAO Zongjun, MA Haihui. Discuss on controlling and forming mechanism of Zaozhuang karst collapse[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2010, 21(4):95 - 98.

[8] Gongyu Li. Wangfang Zhou. Impact of karst water on coal mining in North China [J]. Environmental Geology, 2006, 49(3):449 - 457.

[9] 桂和荣,宋晓梅,彭子成. 淮南煤田阜凤推覆构造带水文地质特征研究[J]. 地球学报, 2005, 26(2): 169 – 172.
GUI Herong, SONG Xiaomei, PENG Zicheng. The transmissivity of Fufeng nappe structural belt in Huainan Coalfield [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(2):169 – 172.

[10] 邢雪, 周丹, 罗跃. 江苏徐州岩溶塌陷及其防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 51 – 58.
XING Xue, ZHOU Dan, LUO Yue. Study on geological disasters of karst collapse in Xuzhou and its protection measures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4):51 – 58.

[11] Zhigan Zhang. Karst types in China[J]. Geojournal, 1980, 4(6):541 – 570.

[12] 熊平生,袁道先,谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4): 355 – 362.
XIONG Pingsheng, YUAN Daoxian, XIE Shiyou. Research Progress on basic problems of rocky desertification in karst mountain areas of South China [J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(4):355 – 362.

[13] 黄河,严家平,朴春德. 淮南大通浅覆盖岩溶区塌陷分布及土地利用可行性[J]. 自然灾害学报, 2012 (2):112 – 117.
HUANG He, YAN Jiaping, PIAO Chunde. Karst collapse distribution and land-use feasibility of shallow overburdentype karst area in Datong District, Huainan City [J]. Journal of Natural Disasters, 2012 (2): 112 – 117.

[14] 王延岭,陈伟清,蒋小珍,等. 山东省泰莱盆地岩溶塌陷发育特征及形成机理[J]. 中国岩溶, 2015, 34 (5):495 – 506.
WANG Yanling, CHENG Weiqing, JIANG Xiaozhen, et al. Development characteristics and formation mechanism of karst collapse in Tailai basin, Shandong Province[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(5):495 – 506.

[15] 李前银. 再论岩溶塌陷的形成机制[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(3):52 – 55.
LI Qianyin. Further study on formation mechanism of karst collaps [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(3):52 – 55.

(上接第 47 页)

[16] 邱子义,韩同春,豆红强,等. 桩后及桩侧土拱共同作用的抗滑桩桩间距分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(3):559 – 565.
QIU Ziyi, HAN Tongchun, DOU Hongqiang, et al. Analysis of spacing between anti-slide piles considering soil arch on lateral sides and back [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50 (3):559 – 565.

[17] DZ/T 0219—2006, 滑坡防治工程设计与施工规范[S].
DZ/T 0219—2006, Specification of design and construction for landslide stabilization[S].

[18] DB 50/5029—2004, 地质灾害防治工程设计规范[S].
DB 50/5029—2004, Design specification for geological disaster prevention and control project[S].

[19] TB 10025—2006, 铁路路基支挡结构设计规范[S].
TB 10025—2006, Design specification for railway roadbed block structure[S].

[20] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京:中国铁道出版社, 1983.
The second survey and design institute of the ministry of railways. Design and calculation of anti-slide pile[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.

[21] JTG D30—2015, 公路路基设计规范[S].
JTG D30—2015, Specifications for design of highway subgrades[S].

[22] 肖世卫,刘成宇. 单排抗滑桩的合理桩间距[J]. 西南交通大学学报, 1993(3):64 – 69.
XIAO Shiwei, LIU Chengyu. The rational distance of anti-slide pikes in one row [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993(3):64 – 69.

[23] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范(2015 年版)[S].
GB 50010—2010, Specification of concrete structure design(2015 edition)[S].