

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.04.06

湖北武汉典型地区岩溶发育特征分析

李慧娟¹, 金小刚², 涂 婧¹, 魏瑞均³, 李海涛⁴, 杨 涛¹

(1. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430051; 2. 北京数码视讯科技股份有限公司, 北京 100085;
3. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川 成都 610000; 4. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 本文在分析以往地质资料和完成的武汉市1:5万岩溶塌陷调查成果的基础上,从武汉市岩溶发育的形态及规模、不同岩溶条带、不同构造条件、不同地层、不同埋深和不同地貌七个方面,分别系统总结了武汉市典型地区岩溶发育的特征。区内岩溶总体中等发育,岩溶形态主要为溶隙、溶孔以及小规模溶洞;在水平方向上存在5个走向NWW—SEE、各自相对独立的碳酸盐岩条带,其中白沙洲条带岩溶最为发育,在垂直方向上浅层溶蚀发育;各地层的岩溶发育强度依次为 $P_2q > T_1d > C_2h + d > T_{1-2}j$;在褶皱核部或转折端、断层带附近、长江一级阶地、山前补给局部分地区等地下水交替循环强烈地带和可溶岩与非可溶岩接触带,岩溶发育相对强烈。结论可为武汉市岩溶塌陷地质灾害防治提供地质基础支撑。

关键词: 岩溶塌陷灾害;岩溶发育;碳酸盐岩条带;特征分析;线岩溶率

中图分类号: P642.252

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)04-0040-08

Analysis on characteristics of karst development in Wuhan of Hubei Province

LI Huijuan¹, JIN Xiaogang², TU Jing¹, WEI Ruijun³, LI Haitao⁴, YANG Tao¹

(1. Geological Environment Center of Hubei Province, Wuhan, Hubei 430051, China; 2. Beijing Sumavision Inc., Beijing 100085, China; 3. Hua-Di Construction Engineering Co., Ltd. in Sichuan, Chengdu, Sichuan 610000, China; 4. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: On the basis of analyzing the previous geological data including the results from 1:50 000 survey on the karst collapse of Wuhan City, the present paper systematically summarizes the characteristics of karst development at typical areas of Wuhan City in perspectives of seven aspects, including the shape and size of karst development, karst belts, tectonic conditions, strata, burial depth and geomorphology. The results indicate that the karst development is generally moderate, and karst morphology are mainly karst fissure, karst pore and small-size karst cave. There are five NWW-SEE and relatively independent carbonate rock belts in the horizontal direction, among which the karst is the most developed for Baishazhou belt, whereas the shallow corrosion is developed in the vertical direction. The karst development levels for various strata are in order of P_2q , T_1d , $C_2h + d$ and $T_{1-2}j$. In general, karst is relatively more developed in two types of zones. One is the active zone of groundwater cycle including the cores or hinge zone of folds, the vicinity of fault zone, the first terrace of Yangtze River and piedmont recharge area, and another is the contact zone between dissoluble rock and insoluble rock. The conclusions of this paper can provide basic supporting geological information for the control on the karst collapse hazards in Wuhan.

Keywords: karst surface collapse disaster; karst collapse; carbonate rock belt; characteristic analysis; linear karst rate

收稿日期: 2018-11-02; 修订日期: 2018-12-17

基金项目: 中国地质调查局矿评项目(1212011220189)

第一作者: 李慧娟(1990-),女,湖北天门人,工程师,硕士,主要从事水工环方面的研究工作。E-mail:906838470@qq.com

通讯作者: 李海涛(1979-),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水工环方面的研究工作。E-mail:liht@cigem.cn

0 引言

岩溶塌陷地质灾害是制约岩溶地区经济社会发展的主要地质环境问题之一。近年来,随着武汉城市化进程的不断深入发展,人类工程活动对地质环境的扰动日益增大,岩溶塌陷事件发生频率有逐年增高之势。2010 年以来,发生的岩溶塌陷就多达 10 余次,给人民的生命和财产安全造成了损失。岩溶塌陷已经成为武汉市城区危害最为严重的地质灾害之一。

武汉市位于我国中部,地处江汉平原东部、长江和汉江交汇处,为长江中游特大城市。武汉市内的岩溶地质条件十分复杂。早在 2008 年,官善友等^[1]就已经对武汉市的岩溶发育规律做过初步分析研究,但是研究范围小,且并不详尽。2014 年,涂婧等^[2]利用 GIS 技术,对武汉市岩溶塌陷区的岩溶发育规律进行了研究。本文以“武汉市岩溶塌陷调查”项目为依托,在收集以往有关武汉市岩溶发育规律研究资料^[3-5]和 2012~2015 年度开展的“武汉市岩溶塌陷调查”项目^[6]的基础上,对武汉市典型地区的岩溶发育特征及影响因素进行了分析总结,系统阐述了武汉市典型地区的岩溶发育特征,为武汉市城市规划建设、岩溶塌陷地质灾害防治等提供重要技术支撑。

1 研究区概况

根据“武汉市岩溶塌陷调查”项目的实际工作范围,研究区共包括汉阳县幅、武汉市幅、阳逻镇幅、金口镇幅、武昌县幅及豹子澥幅等 6 个 1:5 万标准图幅,覆盖了武汉市主城区以及大部分近郊地区(图 1)。

研究区位于我国东南季风气候区,属中亚热带向北亚热带过渡地带,多年平均气温为 16.5℃,多年平均降水量 1 233.3 mm。区内地表水体分布面积广,主要地表水体为长江、汉江以及东湖、汤逊湖等。研究区位于江汉平原与鄂东丘陵山地的交接地带,地形特征带有明显的过渡性质,总体地势为西南、南部、中部高,西北、北部及东部低,地貌以波状起伏垄岗地形为主,丘陵呈近东西向条带状残丘展布,属丘陵、平原地形。

武汉市居于长江经济带的中部核心位置,也是联络“一带一路”和长江经济带的重要枢纽城市。因此,掌握武汉市岩溶发育特征及规律,做好必要的地质基础支撑,对整个国家战略规划的意义是十分重大的。

2 可溶岩分布及埋藏特征

研究区内可溶岩地层主要包括三叠系中下统嘉陵

江组(T_{1-2j})和下统大冶组(T_1d)、二叠系中统栖霞组(P_2q)、石炭系上统黄龙组(C_2h)—大埔组(C_2d),其中大冶组灰岩、栖霞组灰岩、黄龙组—大埔组白云质灰岩有零星出露,嘉陵江组未见露头,大部分隐伏于第四系松散层之下。本文所述岩溶特征及规律,主要针对隐伏可溶岩。

研究区内隐伏可溶岩总体呈 NW—SE 向条带状分布,局部受构造影响岩溶条带发生折曲或间断,条带宽度约 0.8~4.1 km。自北向南可大致分为 5 条各自相对独立的隐伏可溶岩条带(图 2),分别为:①天兴洲可溶岩条带;②大桥可溶岩条带;③白沙洲可溶岩条带;④沌口可溶岩条带;⑤军山可溶岩条带。各可溶岩条带的分布面积见表 1,其中,第④可溶岩条带—沌口条带的分布面积最大,占总可溶岩面积的 64.7%。

根据上覆盖层的不同,隐伏岩溶可分为覆盖型和埋藏型两种类型。区内覆盖型岩溶区分布较广(图 2、表 1),覆盖型可溶岩面积约 492.55 km²,占总可溶岩面积的 64.47%,该区域也是岩溶塌陷经常发生的区域。

表 1 研究区可溶岩分布面积一览表(单位:km²)
Table 1 Table of karst area in each karst belt(unit: km²)

可溶岩 面积	天兴洲 条带	大桥 条带	白沙洲 条带	沌口 条带	军山 条带	合计	所占岩溶面 积比例/%
覆盖型	21.02	64.74	67.11	314.17	25.51	492.55	64.47
埋藏型	13.76	11.44	65.87	180.39		271.46	35.53
合计	34.78	76.18	132.98	494.56	25.51	764.01	100.00

3 岩溶层组类型

根据岩矿样品测试结果(主要包括常规薄片鉴定及常量元素测试)及收集资料统计分析,研究区内除砂屑灰岩、石灰岩角砾岩、粉屑灰岩、含生物石灰岩外,碳酸盐岩整体纯度较高。根据碳酸盐岩层厚度的比例,可将岩溶沉积组合类型大致分为 4 类:连续式(厚度比例>90%)、间层式(厚度比例 60%~90%)、互层式(厚度比例 40%~60%)、夹层式(<40%)。武汉市岩溶层组类型划分见表 2。

4 岩溶水发育特征

区内 5 个岩溶条带之间被志留系坟头组粉砂质泥岩阻隔,为独立的地下岩溶水系统。碳酸盐岩裂隙岩溶水主要赋存于碳酸盐岩溶蚀裂隙及溶洞中,岩溶发育不均衡,靠近断裂带处较发育,一般不受大气降雨及地表水影响(武昌区体育局等个别地段除外),裂隙岩

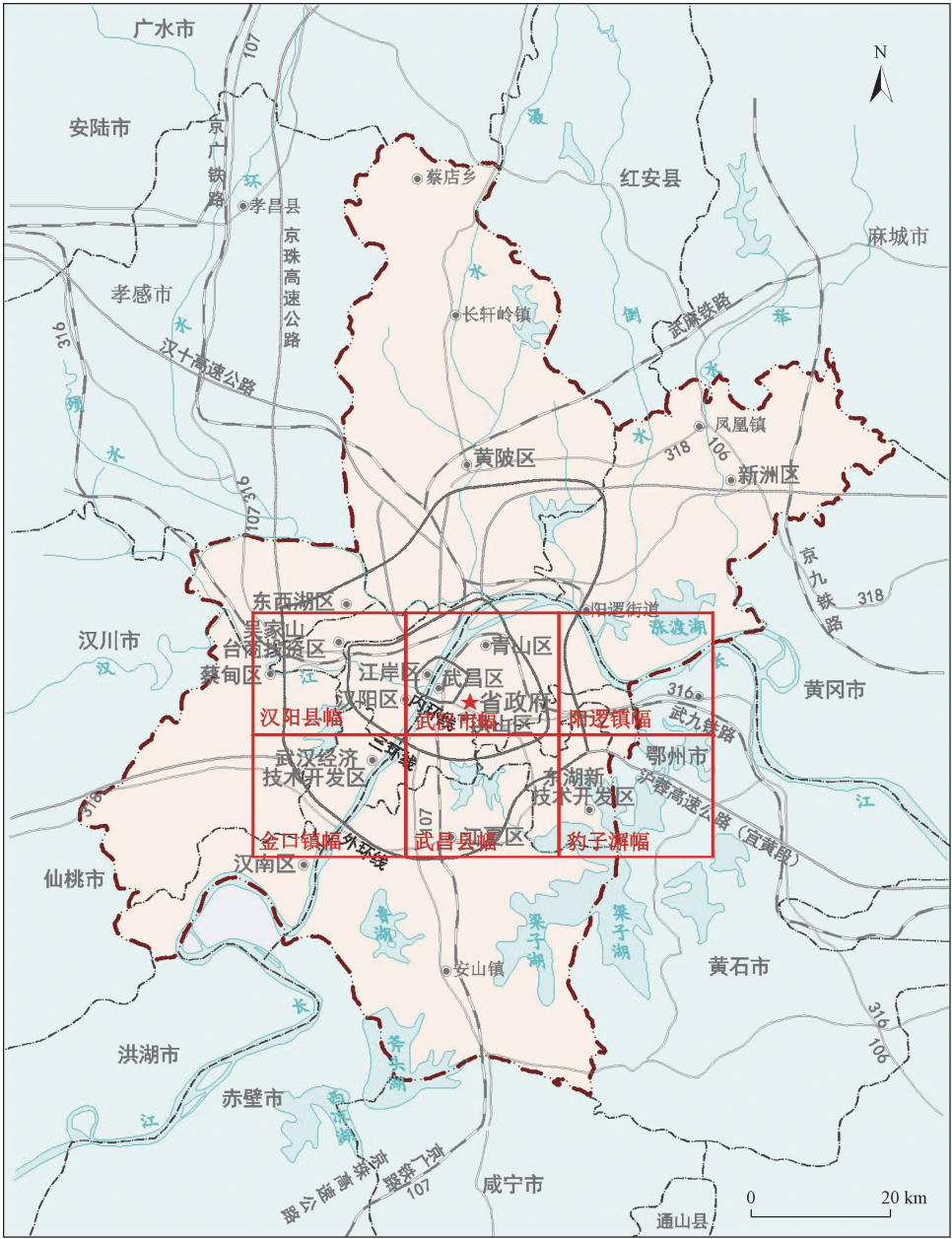


图 1 武汉市交通位置图

Fig.1 Location map of Wuhan City

表 2 岩溶层组类型划分表

Table 2 Classification of karst formation

岩溶层组	地层	岩性特征
类	代号	
连续式碳酸盐岩组合	型	
纯灰岩岩组	C_2h	岩性以灰岩、生物屑灰岩,生物屑以蓝藻类和棘皮类为主,为开阔台地相碳酸盐岩沉积,底部整合于大冶组。
	P_2q	岩性主要为生物屑灰岩、瘤状碳质灰岩和燧石结核灰岩,间夹炭质页岩、燧石条带等。生物碎屑主要为腕足类、棘皮类及介形虫、蓝藻类,生物屑含量由下而上减少。
间层式碳酸盐岩夹碎屑岩组合	T_1d	中上部为砂屑灰岩、颗粒灰岩、鲕粒灰岩、白云质灰岩夹有薄层灰泥岩,底部为黄绿色页岩夹灰泥岩,为一套滨海相碳酸盐岩沉积。
灰岩夹泥岩、页岩岩组	C_2d	岩性主要为泥晶白云岩、生物屑微晶白云岩及白云岩角砾岩,白云岩角砾岩多位于底部。
白云岩夹白云岩角砾岩岩组	T_1-2j	下部和上部为状白云岩夹“岩溶角砾岩”。中部为灰泥岩夹白云质灰岩,为局限台地相-开阔台地相-局限台地相沉积,底部整合于大冶组。
白云岩、白云质灰岩夹岩溶角砾岩、灰泥岩岩组		

来看,岩溶形态主要为溶洞、溶蚀裂隙、溶槽、及小溶孔

等,多沿地层不整合面、岩石层面、裂隙面及破碎带发育。研究区内共收集有钻孔 2 169 个,对其中有效的碳酸盐岩钻孔进行统计分析,全区遇洞率达 37.67%,平均线岩溶率为 7.3%。

溶洞洞高一般为 0.1~6 m,多数在 4 m 以内(91%),仅少数溶洞洞高大于 10 m(1.67%)。溶洞大多呈全充填(65.15%)或半充填状态(16.18%),充填物一般为黏性土、黏土夹碎块及砂,个别少数溶洞充填物为灰岩碎块或方解石矿物晶体颗粒,小部分溶洞无充填(18.67%)。根据统计数据,研究区岩溶总体中等发育,岩溶形态以小规模溶洞为主,较大规模的溶洞较少,溶洞充填物主要来源于上覆第四系地层。

5.2 不同岩溶条带岩溶发育特征

研究区内分布有五条岩溶条带(图 2),各条带之间以志留系坟头组碎屑岩为核部的背斜相分隔,使得各条带为相对独立的岩溶发育系统。不同岩溶条带的发育特征见表 3。

根据统计结果,遇洞率、线岩溶率由大到小的排列

顺序分别为白沙洲条带>军山条带>沌口条带>天兴洲条带>大桥条带,军山条带>白沙洲条带>沌口条带>大桥条带>天兴洲条带。军山条带、白沙洲条带岩溶最为发育;其次为沌口条带、大桥条带;天兴洲条带岩溶发育最弱。最高溶洞出现在沌口条带,高度达 11.9 m。

表 3 各岩溶条带线岩溶率和钻孔遇洞率统计表

Table 3 Statistic table of karstification rate (line and karst cave) in each karst belt

岩溶条带	最大洞高/m	平均洞高/m	遇洞率/%	线岩溶率/%
天兴洲条带	1.95	1.15	33.33	1.61
大桥条带	6	1.49	23.28	4.79
白沙洲条带	11	1.62	49.09	9.75
沌口条带	11.9	2.40	34.53	7.81
军山条带	6.2	2.52	46.67	11.27
总计	11.9	1.91	37.67	7.30

5.3 不同构造条件下岩溶发育特征

图 5 为研究区构造纲要图。不同构造条件主要指褶皱、断裂或断层等。

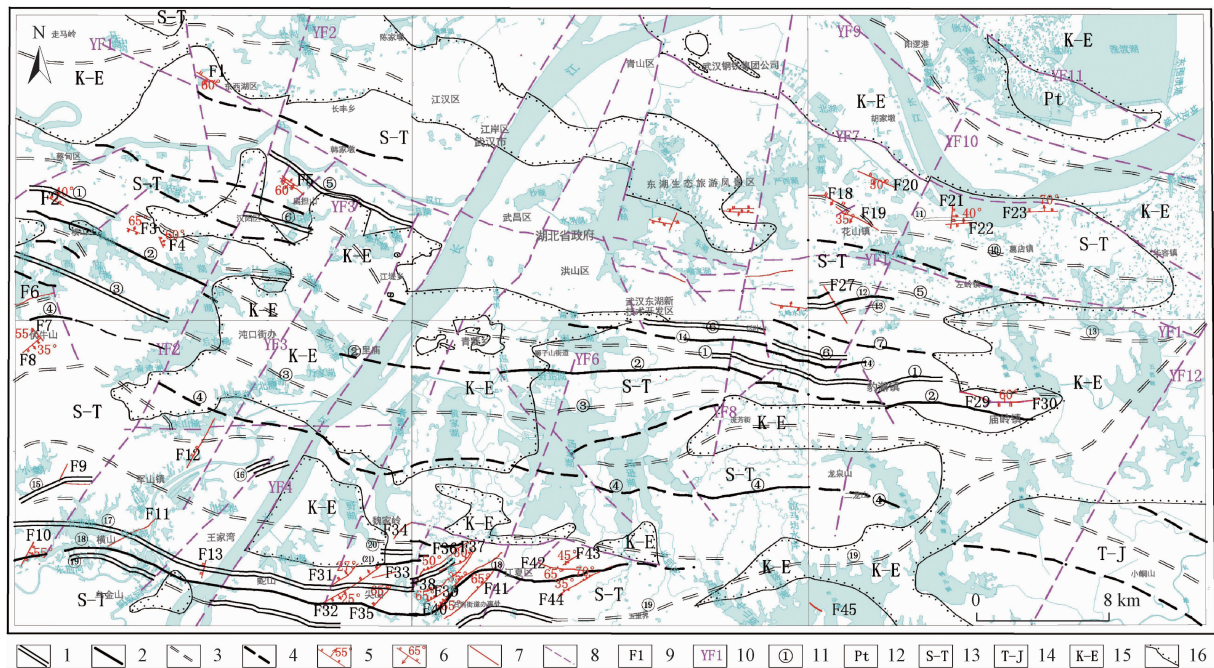


图 5 研究区基岩构造纲要图

Fig. 5 Outline map of bedrock structure

1—向斜;2—背斜;3—隐伏向斜;4—隐伏背斜;5—正断层及断面产状;6—逆断层及断面产状;7—性质不明断层;8—隐伏断层;9—露头断层编号;
10—隐伏断层编号;11—褶皱编号;12—基岩:元古代变质基底;13—基岩:志留纪-三叠纪盖层;14—基岩:
三叠纪-侏罗纪陆相凹陷盆地;15—基岩:白垩纪-新近纪陆相断陷凹陷盆地;16—角度不整合界线。

(1)褶皱:褶皱与裂隙发育密切相关,向斜核部弯曲程度、轴面产状和褶皱倾伏角不同是确定裂隙发育程度的主要依据之一。沌口向斜南侧翼间角大于 30°,为中常褶皱,北侧翼间角大多小于 30°属紧闭褶

皱。天兴洲向斜和大桥向斜在研究区内枢纽倾伏角近于水平,为水平褶皱。大军山向斜枢纽波状起伏,褶皱宽度及核部地层均有所变化,为开阔褶皱,西段局部倒转,轴面南倾,倾角陡。新隆一豹子澌复式倒转向斜东

西分别于北港咀和汤家山扬起,向斜枢纽倾伏角急剧变化,在向斜核部产生次生压力而形成南北向的压性断裂。叠加于区域南北挤压所形成的近东西向压性断裂之上,向斜核部形成网格状裂隙系统。因此,新隆豹子澌复式倒转向斜中的节理裂隙最为发育。裂隙发育程度不一致决定渗透性大小有明显差别,从而影响地下水和地表水的运移,进而影响岩溶发育程度。

另外,褶皱构造中的向斜或背斜核部或转折端岩溶发育。如白沙洲向斜,据钻孔资料统计,核部地层内钻孔平均线岩溶率为 10.87%,遇洞率为 48.2%,翼部地层内钻孔平均线岩溶率为 8.74%,遇洞率为 47.9%。该地段岩石一般较破碎,有利于大气降水和地表水的渗入和径流,形成强径流带,有利于岩溶发育。

(2)断裂或断层:断裂或断层带附近,钻孔岩溶率及线岩溶率均高于其他地区。如 F11 曾家大山断裂,对其周边钻孔按距离断裂 200 m 内、200 ~ 1 000 m 和 1 000 m 外三段进行统计,平均线岩溶率、遇洞率由大

到小排列顺序分别为 21.47% (200 m 内) > 13.08% (200 ~ 1 000 m) > 3.0% (1 000 m 外)、87.5% (200 m 内) > 75% (200 ~ 1 000 m) > 0 (1 000 m 外)。

从断裂角度分析,其影响带内岩体破碎,裂隙连通性好,利于溶蚀、侵蚀作用发展,岩溶发育程度较强。陆家街-青菱乡地区为北北东向的金口断裂和蒋家墩断裂与近东西带断裂交汇地段,断裂就成为地下水径流的主要通道,形成地下水强径流带,增强了地下水对岩土体的溶蚀和潜蚀作用,使得岩溶发育程度增高。该地段多数钻孔中存在与断裂破碎带或裂隙密集带相关的溶蚀现象,深部发育大面积断裂破碎带、纵横交错的方解石脉、以北西西向张裂隙为主控制的岩溶孔洞,在白沙洲条带中的岩溶发育最强,岩溶塌陷事件也最为集中。

5.4 不同地层岩溶发育特征

根据统计分析,不同岩溶地层的岩溶发育特征见表 4。

表 4 不同岩溶地层岩溶发育特征一览表
Table 4 Karst characteristics of different karst strata

地层名称	代号	岩溶发育特征		
		岩溶发育现象	线岩溶率/%	遇洞率/%
二叠系中统栖霞组	P ₂ q	岩溶发育强,发育有较大溶洞	7.69	34.29
三叠系下统大冶组	T ₁ d	岩溶现象较发育,溶蚀多沿裂隙发生,形成岩溶小沟及溶孔、溶隙,局部也发育溶洞	7.52	37.33
石炭系上统黄龙一大埔组	C ₂ h + d	岩溶现象较为发育,主要发育小溶洞、溶隙,以及层面上显示的小溶坑	6.69	43.84
三叠系中下统嘉陵江组	T ₁₋₂ j	岩溶发育较弱,溶蚀现象主要是溶孔,局部也发育溶洞	6.06	29.63

碳酸盐岩岩性越纯、连续分布厚度越大,对岩溶发育越有利,而不溶岩夹层往往对岩溶发育起阻断作用。研究区在 C₂h、C₂d 和 P₂q 地层中,碳酸盐岩整体纯度较高,方解石和白云石含量超过 95%;在 P₂q 地层中,局部夹砂、燧石条带和页岩等不可溶岩;在 T₁d 和 T₁₋₂j 地层中,有页岩、灰泥岩、泥质条带等不可溶岩夹层。

根据地层岩性统计,线岩溶率、钻孔遇洞率由大到小依次为 P₂q > T₁d > C₂h + d > T₁₋₂j, C₂h + d > T₁d > P₂q > T₁₋₂j,研究区内发生的岩溶塌陷大多数分布在三叠系下统大冶组(T₁d)灰岩中。根据区域地质资料和数据统计综合分析,研究区可溶岩地层的岩溶发育强度依次为 P₂q > T₁d > C₂h + d > T₁₋₂j。

5.5 不同埋深岩溶发育特征

选取区内典型地段的钻孔线岩溶率与基岩面下的埋深进行统计分析(图 6),区内浅层溶蚀发育,该区域地下水的交换比较频繁,可溶岩容易受到地下水的溶蚀作用。2013 年,罗小杰^[7]在对大桥条带和白沙洲条带碳酸盐岩线岩溶率与埋深的关系研究中,也得出类似结论。在 0 ~ 5 m 范围内岩溶强发育,平均线岩溶率

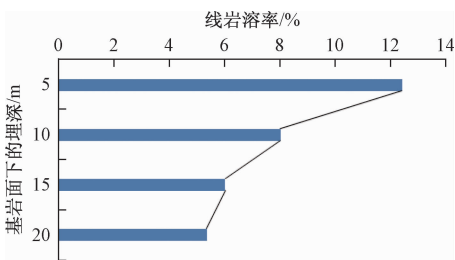


图 6 碳酸盐岩线岩溶率随埋深的变化
Fig. 6 Variety of linear karst rate of carbonate rock with the depth below rock face

达 12.46%。随着深度继续加大,线岩溶率逐渐减小,在 5 ~ 20 m 范围内岩溶中等发育,平均线岩溶率 8.05% ~ 5.40%。据区域面上统计结果,在基岩面以下 20 m 处开始岩溶弱发育。

5.6 不同地貌区岩溶发育特征

针对不同地貌区,岩溶发育强烈的地方主要在长江一级阶地和山前局部地区。

(1)长江一级阶地:据区内有效利用的碳酸盐岩钻孔资料统计,位于长江一级阶地的钻孔遇洞率为

40.0%,线岩溶率为9.23%,位于二级、三级阶地的钻孔遇洞率为36.4%,线岩溶率为6.58%。一级阶地上部含水岩组主要为第四系松散岩类孔隙承压水,透水性好,与裂隙岩溶水水力联系密切,有利于岩溶发育。另外,在临江地段,由于长江深纵切穿了上部第四系含水层顶板,地下水与长江水水力联系强,地下水位波动幅度大,岩溶发育强烈。

(2)山前补给区:在鸡金山、二龙山、长岭山等山前补给区岩溶发育相对强烈。该地区基岩裂隙与岩溶的连通性较好,第四系覆盖层较薄,裂隙岩溶水接受大气降水和碎屑岩类裂隙水补给,地下水交替循环强烈,岩溶发育也强烈。

5.7 可溶岩与非可溶岩接触带岩溶发育特征

在可溶岩与非可溶岩的不整合接触带,岩溶发育,溶洞、溶槽等溶蚀现象较多。如图7和图8分别显示的是揭露了红层与可溶岩接触带发育的溶洞和第四系与可溶岩接触带发育的溶洞。在可溶岩与非可溶岩的接触带,层理发育,非可溶岩作为隔水底板为地下水提供滞留场所和径流通道,为岩溶发育创造了有利条件。

6 结论

本文在阐述了武汉市可溶岩的分布及埋藏、岩溶层组类型等基础条件后,从武汉市岩溶发育形态及规模、不同岩溶条带、不同构造条件、不同地层、不同深度、不同地貌及可溶岩与非可溶岩接触带等7个方面,系统分析和总结了武汉市岩溶发育的基本特征,主要结论如下:

(1)研究区可溶岩空间分布不均匀,以隐伏型岩溶为主,覆盖型岩溶区分布较广。岩溶总体中等发育,岩溶形态以小规模溶洞为主,大规模的溶洞较少,溶洞多呈全充填或半充填状态。

(2)研究区内隐伏可溶岩在水平方向上总体呈NW—SE向条带状分布,军山条带、白沙洲条带岩溶最为发育,其次为沌口条带、大桥条带,天兴洲条带岩溶发育最弱;在垂直方向上,浅层溶蚀发育。

(3)研究区内各地层的岩溶发育强度依次为 $P_2q > T_1d > C_2h + d > T_{1-2}j$ 。

(4)在褶皱核部或转折端、断层带附近、断裂交汇地带、长江一级阶地、山前补给局部地区等地下水交替循环强烈地带和可溶岩与非可溶岩接触带,岩溶发育相对强烈。

岩溶塌陷是岩溶地区面临的主要地质环境问题之一,而做好岩溶塌陷地质灾害防治对于地方政府城市

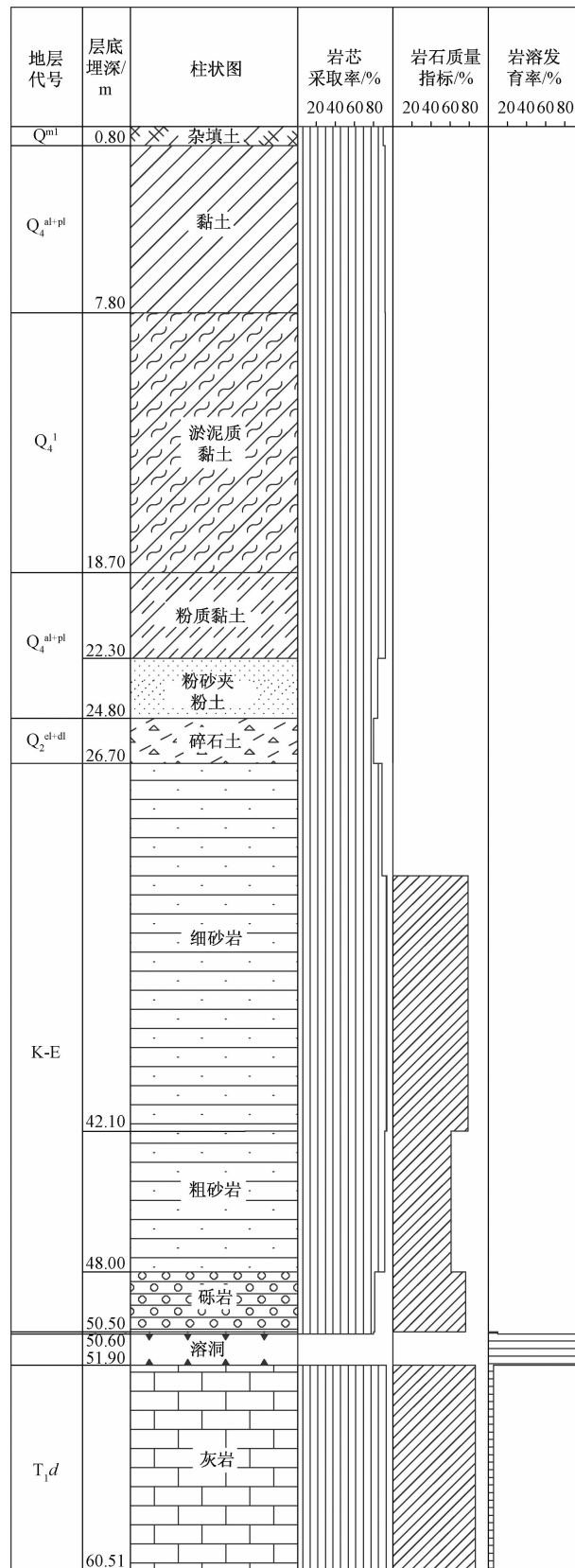


图7 ZK1钻孔柱状图

Fig.7 Histogram of borehole ZK1

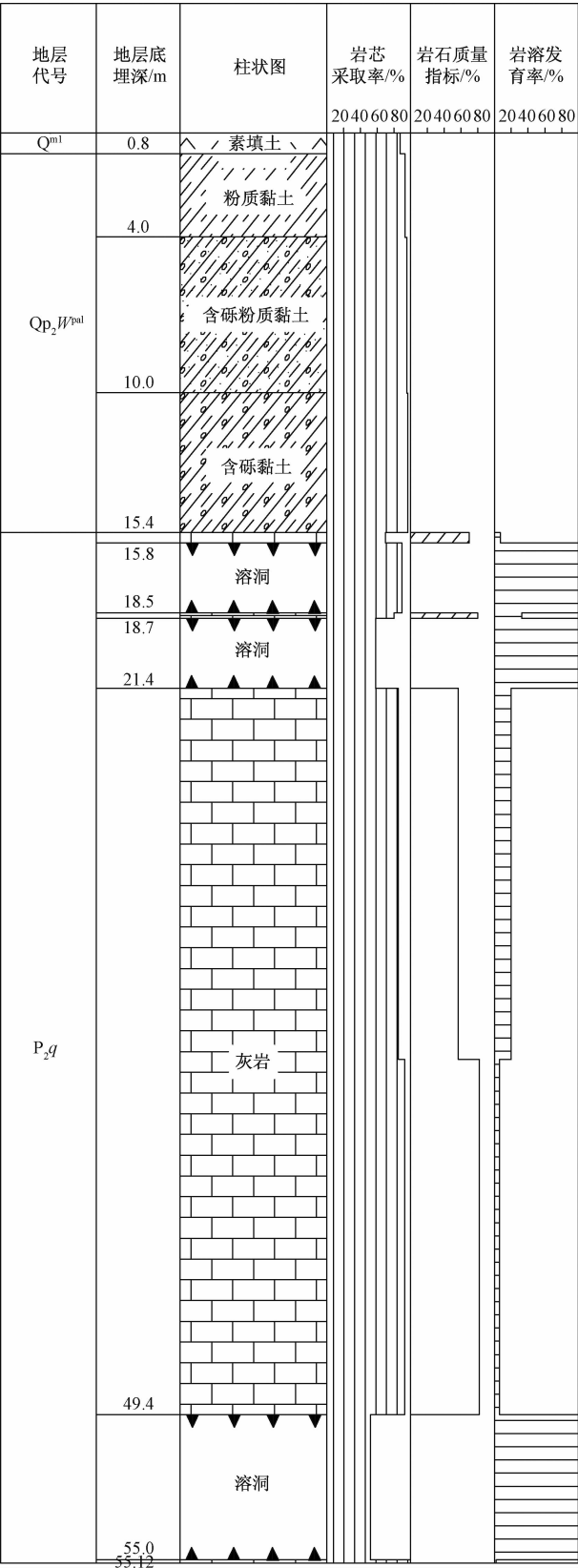


图 8 ZK8 钻孔柱状图

Fig. 8 Histogram of borehole ZK8

规划、社会经济发展等具有十分重要的保障作用。本

文分析总结的武汉市岩溶发育特征可为制定科学合理的武汉市岩溶塌陷地质灾害防治规划和措施提供基础地质技术支撑。

参考文献:

[1] 官善友,蒙核量,周森.武汉市岩溶分布与发育规律[J].城市勘测,2008(4):145-149.
GUAN Shanyou, MENG Heliang, ZHOU Miao. The distributing and growing rules of Karst in Wuhan[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2008 (4):145-149.

[2] 涂婧,杨涛,刘长宪,等.基于GIS武汉岩溶塌陷区岩溶发育规律研究[J].资源环境与工程,2014,28(1):49-52.
TU Jing, YANG Tao, LIU Changxian, et al. Study on karst development law in Wuhan karst collapse area based on GIS [J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(1):49-52.

[3] 罗小杰.试论武汉地区构造演化与岩溶发育史[J].中国岩溶,2013,32(2):195-202.
LUO Xiaojie. On the history of tectonic evolution and karstification in Wuhan[J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(2):195-202.

[4] 邓杰,李定远,周鼎,等.武汉地区构造与岩溶发育程度关系的初步探讨[J].资源环境与工程,2014,28(增刊1):58-67.
DENG Jie, LI Dingyuan, ZHOU Ding, et al. Preliminary discussion on the relationship between tectonic and karst development level in Wuhan[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28 (S1):58-67.

[5] 武汉市轨道交通27号线一期工程岩溶处理项目报告[R].2016.
Report on karst treatment project of phase I project of rail transit line 27 in Wuhan[R]. 2016.

[6] 中国地质环境监测院,湖北省地质环境总站.武汉市岩溶塌陷调查项目成果报告[R].2016.
China Geological Environmental Monitoring Institute, Hubei Geological Survey. Report on the results of the karst collapse investigation in Wuhan. [R]. 2016.

[7] 罗小杰.武汉地区浅层岩溶发育特征与岩溶塌陷灾害防治[J].中国岩溶,2013,32(4):419-432.
LUO Xiaojie. Features of the shallow karst development and control of karst collapse in Wuhan [J]. Carsologica Sinica, 2013, 32(4):419-432.