

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.052>



武汉市碳酸盐岩天兴洲条带砂化白云岩成因机理及其工程特性

莫云¹, 胡新丽^{1*}, 崔德山¹, 谢昭宇¹, 金新锋², 熊宗海³

1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中机三勘岩土工程有限公司, 湖北武汉 430011

3. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430081

摘要: 武汉市碳酸盐岩天兴洲条带, 发育一套巨厚层砂化白云岩。为查明该岩层的成因及工程特性, 采用构造调查、薄片鉴定、X 射线衍射试验(X-ray diffraction, XRD)、X 射线荧光光谱分析试验(X-ray fluorescence, XRF)、颗粒分析试验、饱和单轴抗压强度试验等多种方法, 对砂化白云岩成因及其工程特性进行深入研究。结果表明: 研究区位于 3 条断裂之间, 且地层出现倒转现象, 表明该区域在印支期所受的挤压应力及燕山期所受的张拉应力非常强烈, 区域构造特征及显微镜下照片也佐证了这一观点; 砂化程度越强烈, 白云石矿物含量就越低, 而石英及黏土矿物含量则越高; CaO、MgO 等主量化学成分迁移演化特征与白云岩砂化过程呈一定的负相关性, 而 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 等主量化学成分则与之呈一定的正相关性。综上所述, 研究区内砂化白云岩及其不均性特征的成因机理可以从“宏观构造动力作用”、“细观矿物结构组成”和“微观化学成分变迁”3 个层面予以概括。砂化程度对白云岩饱和单轴抗压强度影响极大, 其在砂化阶段“微—弱、微—中、微—强”的降幅分别可达 38.6%、68.1%、90.0%, 且呈幂函数关系; 由此, 拟合得到⑤₁ 全砂化极破碎白云岩的饱和单轴抗压强度标准值为 1.3 MPa, 解决了全砂化白云岩难以制作标准岩样进行室内试验获取岩体力学参数的工程难题。

关键词: 武汉市碳酸盐岩天兴洲条带; 砂化白云岩; 成因机理; 工程特性; 工程地质。

中图分类号: P64.4

文章编号: 1000-2383(2025)06-2298-13

收稿日期: 2024-02-22

Formation Mechanism and Engineering Characteristics of Sandy Dolomite in Wuhan Tianxingzhou Carbonate Rock Belt

Mo Yun¹, Hu Xinli^{1*}, Cui Deshan¹, Xie Zhaoyu¹, Jin Xinfeng², Xiong Zonghai³

1. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2. China Machinery TIDI Geotechnical Engineering Co., Ltd., Wuhan 430011, China

3. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

Abstract: The Tianxingzhou carbonate rock belt in Wuhan has developed an exceptionally thick sandstone dolomite formation. To elucidate the genesis and engineering characteristics of this rock formation, a comprehensive study was undertaken employing

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作与交流项目(No.42020104006)。

作者简介: 莫云(1981—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计、施工、监测与检测方面的实践与研究工作。ORCID: 0009-0005-2589-9432. E-mail: 18317108@qq.com

***通讯作者:** 胡新丽, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治及岩土体稳定性评价等研究工作。ORCID: 0000-0003-3440-0064. E-mail: huxinli@cug.edu.cn

引用格式: 莫云, 胡新丽, 崔德山, 谢昭宇, 金新锋, 熊宗海, 2025. 武汉市碳酸盐岩天兴洲条带砂化白云岩成因机理及其工程特性. 地球科学, 50(6): 2298–2310.

Citation: Mo Yun, Hu Xinli, Cui Deshan, Xie Zhaoyu, Jin Xinfeng, Xiong Zonghai, 2025. Formation Mechanism and Engineering Characteristics of Sandy Dolomite in Wuhan Tianxingzhou Carbonate Rock Belt. *Earth Science*, 50(6): 2298–2310.

various methods, including structural surveys, thin section analysis, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), particle analysis, and saturated uniaxial compressive strength tests. The results indicate that the study area is situated between three faults, and the strata are inverted, suggesting that the region experienced intense compressive stress during the Indosinian period and tensile stress during the Yanshan period. Regional structural features and microscopic observations corroborate this interpretation. Notably, the higher the degree of sandstone, the lower the dolomite mineral content, and the higher the quartz and clay mineral content. The migration and evolution characteristics of major chemical components, such as CaO and MgO, exhibit a negative correlation with the dolomite sandstone process, while components like SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ display a positive correlation. In summary, the primary causes of the dolomite sandstone and its heterogeneous characteristics in the study area can be attributed to three distinct scales: “macroscopic structural dynamics”, “microscopic mineral structure composition”, and “microscopic chemical composition evolution”. The degree of sandstone significantly influences the saturated uniaxial compressive strength of dolomite. The reduction amplitudes for the “micro-weak”, “micro-medium”, and “micro-strong” sandstone stages can reach 38.6%, 68.1%, and 90.0%, respectively, exhibiting a power function relationship. Consequently, the standard value of the saturated uniaxial compressive strength for the fully sandstone and extremely broken dolomite in ⑤₁ layer was fitted to be 1.3 MPa, resolving the engineering challenge of obtaining rock mechanics parameters for fully sandstone dolomite through indoor testing of standard rock samples.

Key words: Wuhan Tianxingzhou carbonate rock belt; sandy dolomite; formation mechanism; engineering properties; engineering geology.

0 引言

自从学者们(何文秀,2008;胡相波,2009;崔杰,2009;张良喜,2012;张良喜等,2012a,2012b,等)在四川美姑河坪头水电站提出“砂化白云岩”的概念以来,白云岩及其砂化成因、规律、程度分级及其物理力学性质等问题,越来越受到业界关注:崔杰(2009)将顺层岸坡深部变形破坏现象与深部白云岩砂化现象并列研究,认为白云岩微观溶蚀特征主要受白云石成岩类型与矿物微结构控制.王朋朋等(2019)研究了贵州砂化白云岩物理力学性质受环境影响的程度及规律.Richter *et al.*(2018)从化学元素层面研究了白云岩砂化机理和破坏模式.姚婷婷等(2020)通过分析白云石同位素地球化学特征,认为渤海湾盆地黄河口凹陷沙河街组白云岩成因机理及过程为:淡水淋滤→成岩环境微生物影响→胶结作用→埋藏白云岩化.刘志波等(2021)和李文奇等(2023)分别通过地球化学、同位素和稀土元素分析,发现不同类型的白云岩具有不同的地球化学特征及白云石化机理.郭颖等(2023)通过对白云岩主量和微量元素、碳—氧同位素及稀土元素分析,发现南京地区不同时期内白云岩的成因有:渗透回流白云石化模式、埋藏白云石化模式、热液白云石化模式、埋藏白云石化和热液白云石化叠加作用模式.

学者们之所以如此重视白云岩砂化问题,是因

为白云岩的砂化尤其是全一强砂化,会导致岩体质量急剧降低,对围岩硐室、隧道或边坡支护等工程设计与施工产生较大不利影响,导致施工进度缓慢、造价增加、安全受到威胁等一系列工程地质问题:黄润秋等(2016)研究发现,大光包滑坡的主滑面岩层为强烈砂化白云岩层,一方面滑带岩体的碎裂、细粒化从物理上降低了滑带的摩阻力;另一方面汶川超强地震引发砂化层突然产生超空隙压力而流态化,是导致山体突然滑坡的主要原因.王志杰等(2021)、Jiang *et al.*(2022,2023)和Zhou *et al.*(2023)对隧道围岩稳定性受白云岩砂化程度的影响及其破坏控制判据进行了定量数值分析.赵泽昌等(2023)发现中等砂化白云岩岩体呈块状破碎结构,爆破控制难度很大并对其建模计算,提出了适用于中等砂化白云岩的光面爆破设计参数的合理取值范围.Dong *et al.*(2023)、Jiang *et al.*(2022,2023)和Zhou *et al.*(2023)认为富水砂化白云岩岩层在隧道施工中容易发生涌水、涌沙灾害,他们分别从渗流破坏类型与机理、渗流压力降低、渗流破坏治理等方面研究了该问题.

武汉市碳酸盐岩天兴洲条带,发育一套巨厚层砂化白云岩层.其中,因全砂化导致的极破碎岩层,厚度变化极大,由此引发了一系列工程地质难题,例如:因全砂化白云岩的节理裂隙强发育、岩体结构极破碎,难以制作标准岩样通过室内试验获取岩体力学参数;对于桩基工程来说,该岩层的相关桩

基参数如何取值尚缺乏经验. 目前, 对该岩层的成因及其工程特性研究非常有限, 其物理力学指标的取值又必须以此作为基础才能更加准确并符合工程实际. 为此, 采用构造调查、薄片鉴定、XRD (X-ray diffraction) 试验、XRF (X-ray fluorescence) 试验、颗粒分析试验及饱和单轴抗压强度试验等多种方法, 进行了深入研究与论证, 为砂化白云岩的力学性质、桩基参数取值等研究打下基础, 具有重要的工程实践意义.

1 研究区概况

武汉市 6 个碳酸盐岩条带相对独立且平行分布 (图 1), 其中最北部的天兴洲条带 (L1) 东西向长约 49.8 km, 南北向宽处约 5.27 km、窄处约 0.35 km, 覆盖面积约 110 km², 是武汉市汉口北城市发展主要区域.

研究区地理上位于武汉市黄陂区, 地质上处于天兴洲条带 (L1) 西北端, 地貌上以剥蚀堆积垄岗为主, 区域上为团鱼山—青山向斜核部. 区内碳酸盐

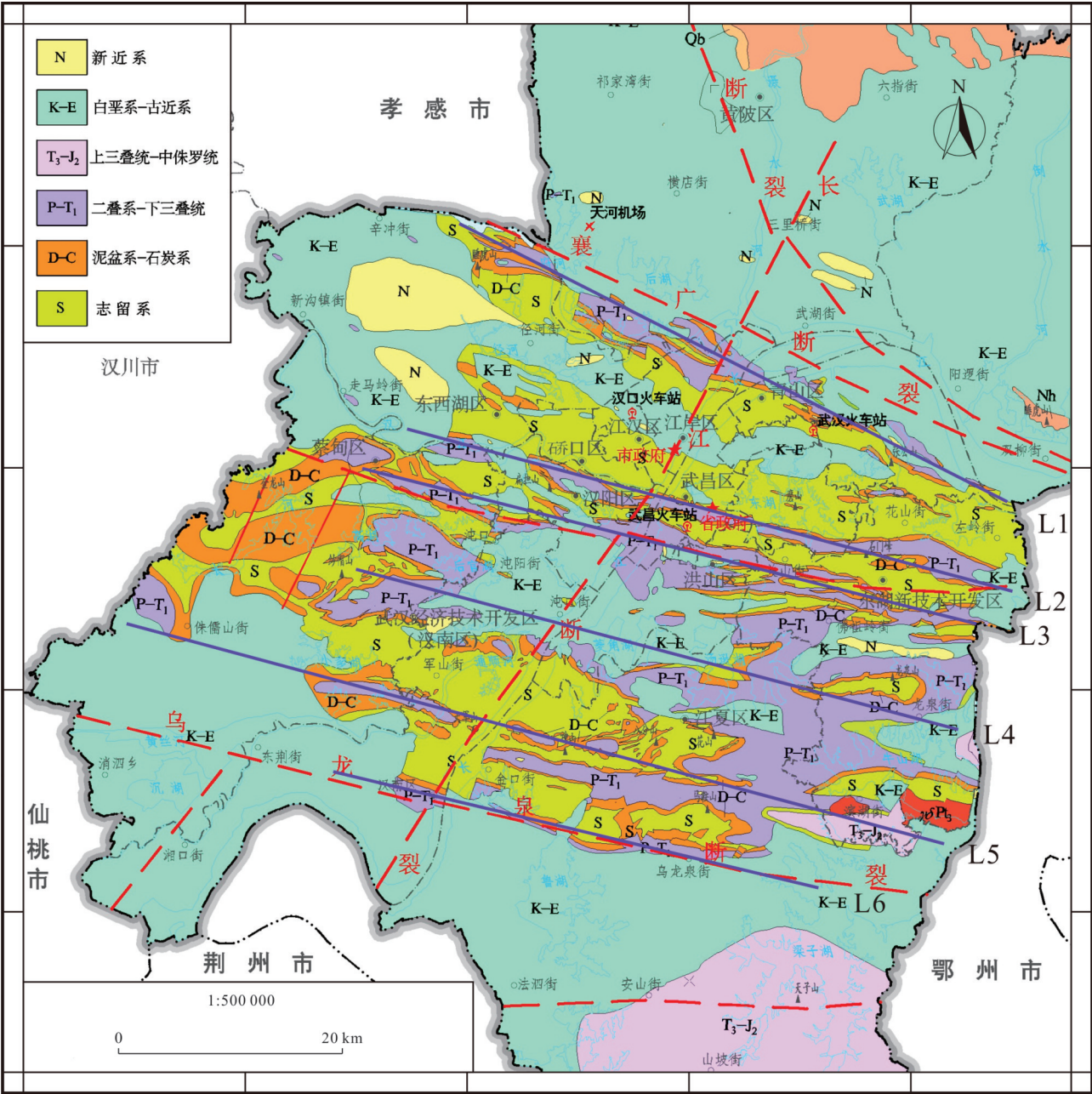


图 1 武汉市碳酸盐岩条带分布图(底图据中国地质调查局武汉地质调查中心, 2019)
Fig.1 Distribution map of carbonate rock belt in Wuhan (after Wuhan Center of China Geological Survey, 2019)

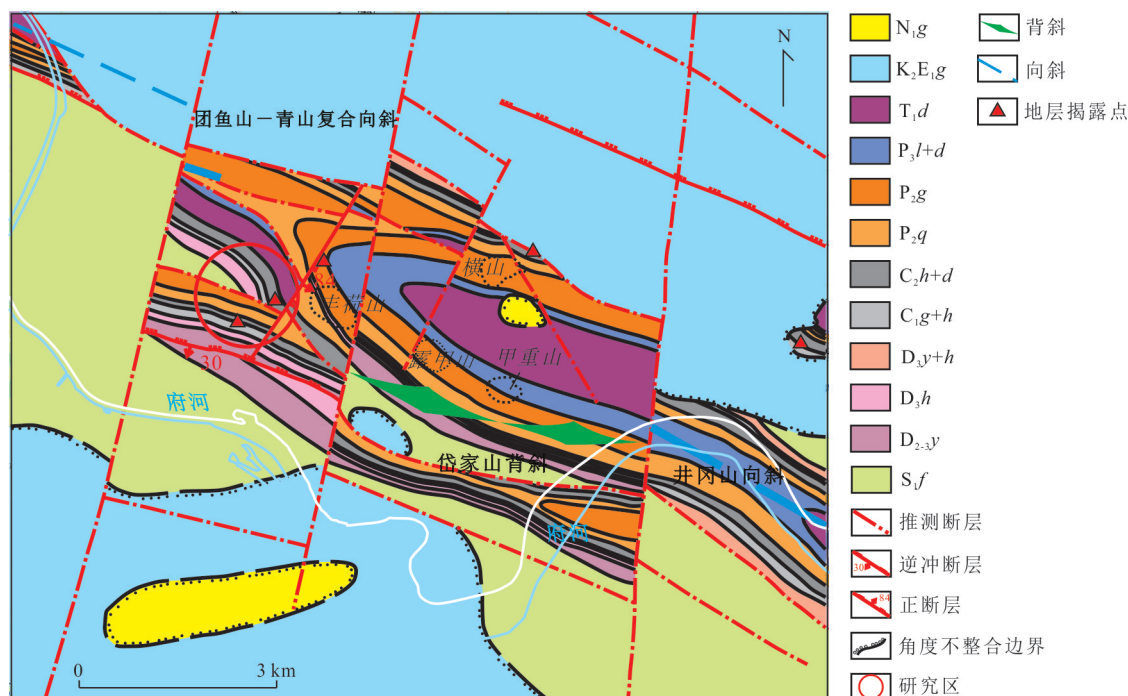


图2 研究区域地质构造图

Fig.2 Geological structure map of study area

岩地层包括泥盆系黄家登组 D_3h 、石炭系大埔组 and 黄龙组并层 C_2h+d 、二叠系栖霞组 P_2q 、三叠系大冶组 T_1d 。因天兴洲碳酸盐岩条带岩溶发育异常(罗小杰, 2013, 2015), 区内碳酸盐岩白云岩化、白云岩砂化现象强烈, 形成一套巨厚层砂化白云岩地层。目前揭露该套地层的地点为: 东起刘店立交, 中部在盘龙城大道与巨龙大道交汇处南侧, 西至龙港大道与航城西路交汇处。该走向与天兴洲条带长江北岸中段的石炭系走向基本相符(图2)。根据其岩性、岩心, 结合区域基岩地质图, 初步判断为石炭系大埔组和黄龙组并层 C_2h+d , 厚层状白云质角砾岩、细晶白云岩。

2 砂化白云岩分层及其岩心特征

分析整理了上述揭露点的大量勘探资料, 将白云岩层划分为⑤₁全砂化(极破碎—破碎)、⑤₂弱砂化(较破碎—较完整)两个大层以及“⑤_{1a}强砂化、⑤_{2a}中砂化、⑤_{2b}微砂化”等3个透镜体层, 见图3(限于篇幅, 仅展示了⑤₁及⑤₂两个主层的照片)。

总体上, 白云岩的砂化以全砂化和弱砂化为主, 其余程度的砂化层不能单独成层, 分别是⑤₁和⑤₂层的透镜体, 各岩层岩心特征如下。

⑤₁层: 全场分布, 岩体极破碎, 厚度变化极大、

普遍揭露厚度 10~20 m, 最小揭露厚度 0.7 m, 最大揭露厚度可达 37.9 m, 岩心呈砂糖状细颗粒, 无法取得原状样, 取心率低, 约 45%, RQD 指标几乎为 0, 该岩层有别于一般全—强风化岩, 对其进行标贯或动探试验均不能正常击入, 说明其在原位状态时岩体仍具有一定强度; ⑤_{1a}层: 呈透镜体分布于⑤₁层白云岩内, 分布无规律, 局部层厚可达 1~2 m, 岩体破碎, 岩心呈短柱状或碎块状, 取心率低, 约 60%, RQD 指标为 20% 左右, 强砂化现象应属砂化白云岩中典型的“砂包石”现象。

⑤₂层: 全场分布, 受砂化不均匀性影响, 埋深相差极大; 岩体较完整, 岩心呈短柱或长柱状, 取心率高, 约 80%, RQD 指标为 70% 左右; ⑤_{2a}层: 呈透镜体分布于⑤₂层内, 分布无规律, 岩体较破碎, 岩心呈短柱状, 取心率稍高, 约 65%, RQD 指标为 50% 左右; ⑤_{2b}层: 呈透镜体分布于⑤₂层内, 分布无规律, 岩体完整, 岩心呈短柱或长柱状, 取心率高, 约 85%, RQD 指标为 70% 左右。

研究区内的全砂化白云岩并非呈条带状分布, 而是大范围、巨厚层分布; 全砂化白云岩形成的颗粒物只到粗砂级别, 尚未形成白云岩粉乃至粉质黏土。总体上, 同一场地内砂化程度有随着埋深的增大而逐渐减弱的趋势, 但全—弱砂化的厚度变化极大, 规律性不强, 存在各向异性特征。无论是何种程

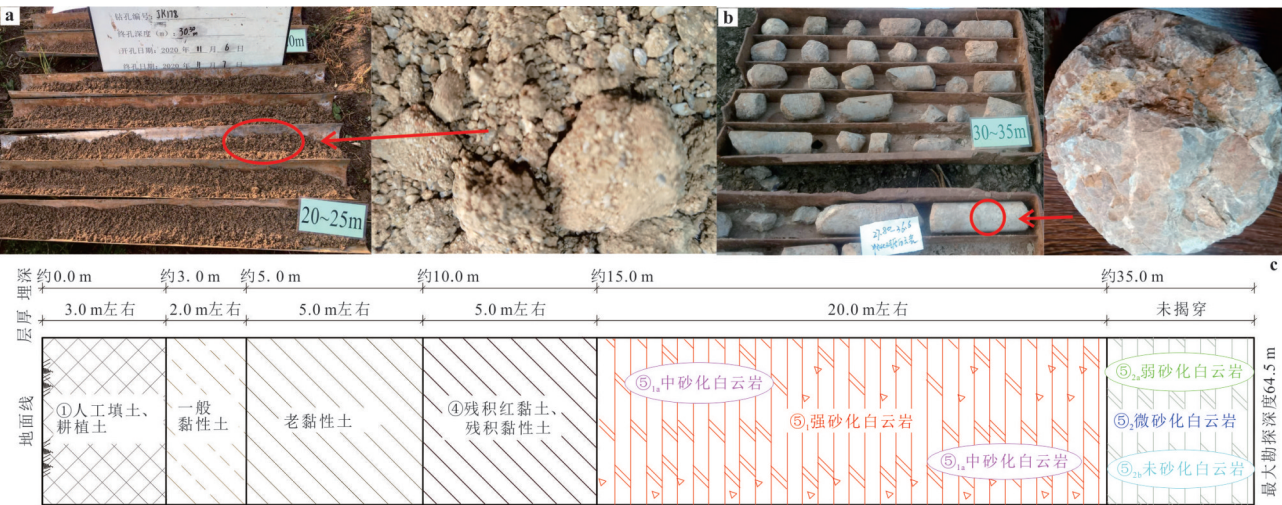


图3 砂化白云岩主层岩心照片及钻孔柱状图

Fig.3 Core detail photos and column chart of sanding dolomite main layer

a.⑤₁全砂化白云岩;b.⑤₂弱砂化白云岩;c.钻孔柱状图

度的砂化,不均匀性总是伴随着整个钻进过程,这给钻探施工、勘察分层及桩基选型等工作带来很大困难.

3 砂化白云岩成因

3.1 宏观构造动力作用

受地质构造演化与碳酸盐岩发育史影响,武汉市发育两套碳酸盐岩地层:第一套为古生代中晚期形成的石炭系大埔组和黄龙组并层 C_2h+d 及二叠系栖霞组 P_1q 灰岩;第二套为中生代早期形成的三叠系大冶组 T_1d 灰岩.

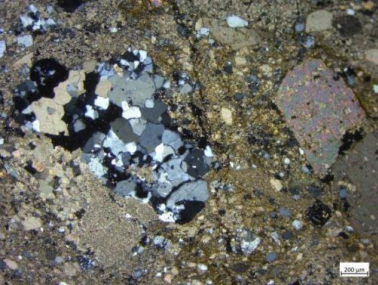
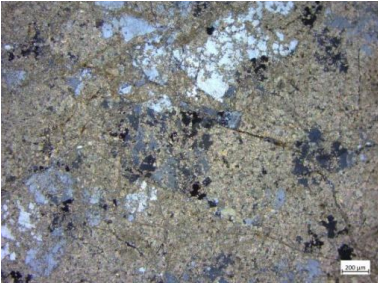
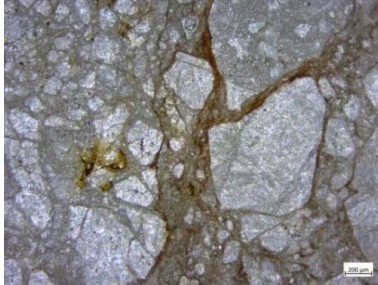
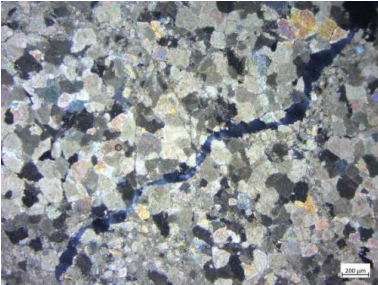
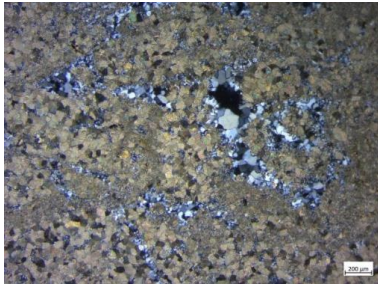
研究区所处的天兴洲条带西北端,区域内主要发育志留系 S、泥盆系 D、石炭系 C、二叠系 P、三叠系 T、白垩系 K、古近系 K-E、新近系 N,缺失侏罗系 J,推测侏罗系整体发生抬升剥蚀(图 2).其中,志留系 S、泥盆系 D、石炭系 C、二叠系 P、三叠系 T 发生了褶皱变形,而白垩系 K、古近系 K-E、新近系 N 所受构造作用较小,大部分新近系 N 被抬升剥蚀,只留下少部分覆盖于古近系 K-E 之上.该区域构造上主要受 3 条 NNE-SSW 向张性断裂控制,切割的最新地层为白垩—古近系公安寨组 K_2E_1g 陆相红色碎屑岩,对先期构造起到明显改造作用,而未切割 N_1g 地层,因此推测为燕山运动造成.NNE-SSW 向大断裂之间发育的 NWW-SEE 向构造,被该断裂所切割,因此推测该构造较该断裂更早,应为印支运动形成.NWW-SEE 向构造主要受挤压应力作用造

成,其向斜核部为三叠系 T,故推测为三叠系 T 之后形成,并伴生发育同走向压、压扭性断裂.

区域内褶皱主要为团鱼山—青山复式向斜,呈 NWW-SEE 向展布,长约 40 km,宽 3.0~3.5 km,向斜西端于睡虎山一带扬起,其核部为三叠系大冶组 T_1d ,局部被白垩—第三系 K-E“红层”覆盖.北翼发育两条规模较大的北西走向断层,南翼由次一级岱家山背斜、戴家湖背斜、井冈山向斜和楠木桥向斜构成.区域西北部发育一条 NE 走向小型正断层,倾向 SE,倾角 84° ,说明该处系受较大张拉应力而形成,并受限于下部的 NWW 走向断裂,因此推测该小型正断层为 NNE 向大断裂同期形成的伴生断裂.

襄樊—广济断裂长期活动历史,对武汉市构造尤其是碳酸盐岩的平面分布产生了深远影响.中生代中早期(三叠纪末)的印支运动,产生强烈的 NNE-SSW 向挤压应力作用,导致武汉地区形成了一系列 NWW-SEE 近平行走向的线状褶皱,从而形成了包括天兴洲条带在内的 6 条碳酸盐岩条带相对独立且近平行分布的总体格局,同时为白云岩的产生提供了母岩基础;中生代中晚期(白垩纪)的燕山运动,又使挤压应力作用向张拉应力作用转变,该转变形成的张性断裂(裂隙)为同时期大量喷发的构造热液提供了流动通道,使得紧邻襄樊—广济断裂的天兴洲条带碳酸盐岩较远离该断裂的其他条带碳酸盐岩发生了更为强烈的构造热液白云岩化、硅化作用(Davies and Smith, 2006; 李荣等, 2008; 刘宏等, 2016).

表 1 ⑤₂层白云岩显微镜下照片及其特征
Table 1 Microscopically photographs of ⑤₂ dolomite and its characteristics

BP1-1	BP2-2	BP3-2
		
角砾状结构,形成大小不等的孔洞和裂隙,被白云岩、硅质岩碎屑及粒间岩石矿物碎粒、碎粉填充(起胶结作用),低级区域变质	碎裂结构,形成大小不等的孔洞和裂隙,被碎粒、碎粉或石英充填;动力变质	角砾状结构,形成大小不等的孔洞和裂隙,局部充填破碎的岩粒并发生褐铁矿化,岩石角砾含量较低区域,多为微晶白云石与硅质物质;动力变质
BP4-1	BP5-1	BP6-2
		
微晶结构,裂隙发育,其宽度窄、延伸长,内部充填碳酸盐矿物,少量被硅质矿物充填,也有中空者;生物碎屑灰岩被白云石交代,动力变质	角砾状结构,形成大小不等的白云岩碎屑,周围为岩石或矿物碎粒、碎粉,有贯穿裂隙;动力变质	角砾状结构,形成大小不等的孔洞和裂隙,岩石角砾周围裂隙内见无色硅质填充;动力变质

对⑤₂层所做的12组薄片鉴定试验,佐证了上述观点,显微镜下照片见表1(仅展示了部分有代表性的照片),分析表明:(1)显微镜下定名多为“浅变质细晶白云岩角砾岩”,少有“碎裂状微、细晶白云岩”,符合石炭系大埔组 and 黄龙组并层C₂h+d白云岩的特征。(2)岩石的白云岩化很彻底,白云石含量在75%~95%,普遍存在动力变质、局部有变质重结晶现象,大部分岩心呈角砾状结构,是强烈岩石动力变质作用的反映。(3)在构造应力作用下,白云岩发生碎裂,形成角砾碎屑和碎粒、碎粉,发育规模不等的裂隙和孔洞并被岩石碎粒、碎粉填充,少部分被碳酸盐矿物或硅质矿物集合体充填,对岩石起胶结作用。

3.2 细观矿物结构组成(XRD 试验)

对5类不同砂化程度的白云岩分别取样进行了5组矿物成分分析试验(XRD),各砂化程度时白云

表 2 各砂化程度时白云岩矿物成分含量(%)
Table 2 The contents of dolomite mineral composition in different sanding degrees (%)

层号及名称	白云石含量	铁白云石含量	石英石含量	高岭土含量
⑤ ₁ 全砂化	49.79	24.59	10.46	15.17
⑤ _{1a} 强砂化	55.58	22.88	11.54	10.01
⑤ _{2a} 中砂化	42.65	37.76	11.85	7.73
⑤ ₂ 弱砂化	47.66	39.51	12.83	0.00
⑤ _{2b} 微砂化	82.78	13.63	2.84	0.75

岩矿物成分含量统计结果见表2,图4(限于篇幅,仅展示了⑤₁及⑤₂两个大层的试验图片)。

各砂化程度下,研究区内白云岩的矿物组成主要有以下特征:(1)白云岩矿物成分以白云石(CaMg(CO₃)₂)、铁白云石(Ca(Fe,Mg,Mn)(CO₃)₂)、

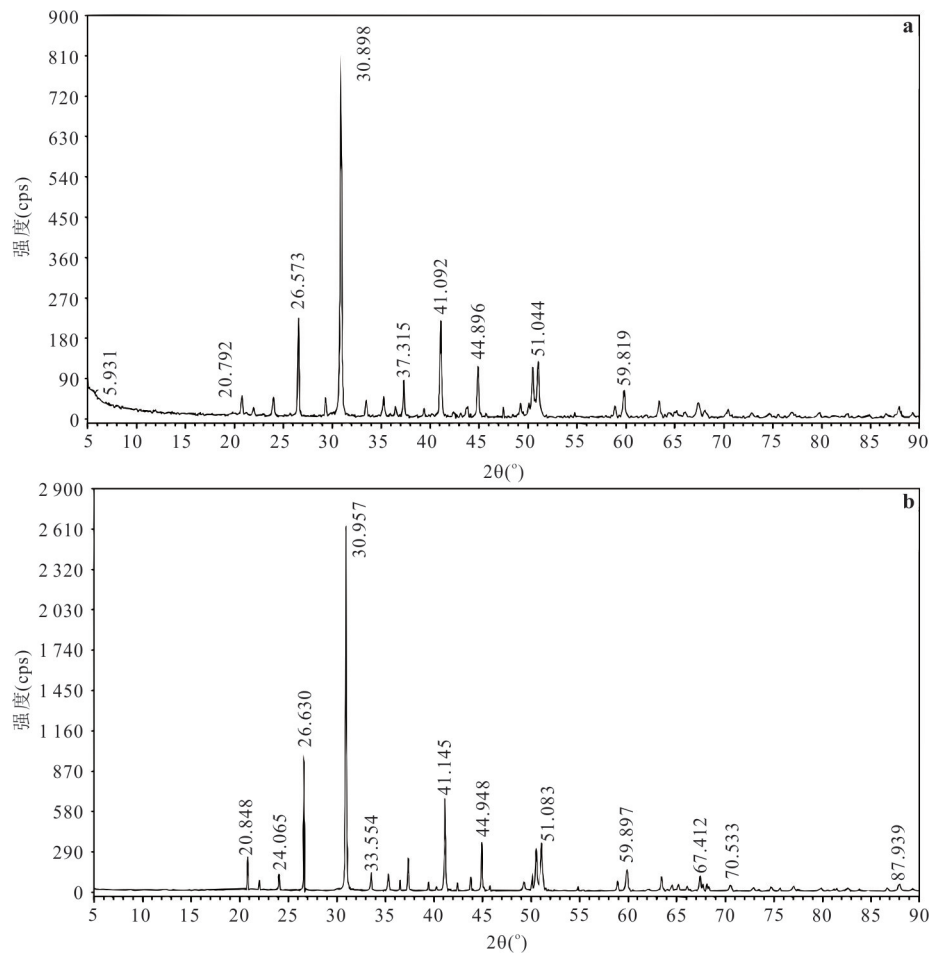


图 4 白云岩矿物成分含量实测
Fig.4 Measured map of dolomite mineral composition
a.⑤₁全砂化白云岩;b.⑤₂弱砂化白云岩

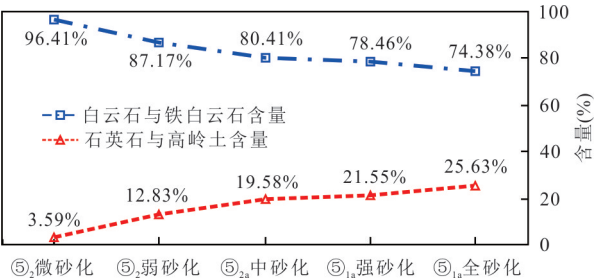


图 5 主要矿物含量随砂化程度变化
Fig.5 Content of main minerals varying with sanding degree

石英石(SiO_2)及黏土矿物(高岭土($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$))为主,在74.38%~96.41%;很明显,砂化程度越强烈,白云石及铁白云石的含量越低,而石英石及黏土矿物的含量则越高(图5).(2)白云岩矿物成分不纯、多样,且存在中空孔隙和裂隙,这一方面为岩溶裂隙水提供了更好的流动通道,另一方面又使得白云岩的多样化矿物之间呈分散形态,从而导致差异

溶蚀现象,此时方解石作为主要胶结物,结构链接相对较弱,首先被溶蚀并被岩石矿物碎粒、碎粉取代;同时,白云岩主要沿晶间孔或晶体结合面溶蚀分解及切性割崩解,在溶蚀过程中常伴有晶体的脱落,从而形成类似砂糖状白云岩砂颗粒乃至白云岩粉.

3.3 微观化学成分变迁(XRF 试验)

对上述5个不同砂化程度的白云岩,开展了XRF试验,结果见表3.分析可知:(1) CaO 、 MgO 是白云岩的主要化学成分,其平均含量之和为39.34%.根据化学含量换算,白云石含量平均值应大于70.00%,纯度较高,这与显微镜下判别及XRD试验的测试结果基本吻合; CaO 、 MgO 的含量比值在2.65~4.61,较不稳定,说明白云岩历史沉降环境较不稳定,受到气候及构造作用较大,这与薄片鉴定结果基本一致;注意到⑤₁层的 CaO 、 MgO 的含量之和仅14.92,而⑤_{2b}层的 CaO 、 MgO 的含量之和为

50.69%,可见随着砂化程度的增强,Ca、Mg 逐渐溶蚀淋失,CaO、MgO 的含量则逐渐减少(图6)。(2) SiO₂也是白云岩中的重要化学成分,属稳定难溶矿物,含量在 8.54%~43.96%,平均含量为 18.94%,甚至高于 MgO 的平均含量,这充分说明研究区内白云岩砂化程度高且不均匀的特征;注意到 SiO₂的含量明显随着砂化作用的加强而升高,总体上呈幂函数形式增长(图6);发展到全砂化程度后,白云岩中 SiO₂富集明显,甚至超过了 CaO、MgO 含量之和; SiO₂这一变化过程与 CaO、MgO 的含量变化过程体现了很好的负相关性;初期 CaO、MgO 溶蚀淋失量相对较小, SiO₂主要以微粒石英形式残留,随着砂化作用的加剧, SiO₂含量能增加到原来的几倍乃至十几倍。(3) Al₂O₃、Fe₂O₃、Na₂O、K₂O 是黏土矿物的主要化学成分,它们共同反映了岩石中的泥质含量,这 4 种化学成分各自含量均不高,且以 Al₂O₃为主;在末砂化—强砂化阶段,4 种化学成分之和仅在 0.46%~2.08%,但进入全砂化阶段后其迅速增大至 15.11%。因此,可以推断白云岩砂化是长期、渐进过程,而泥化则是其全砂化阶段后的产物。

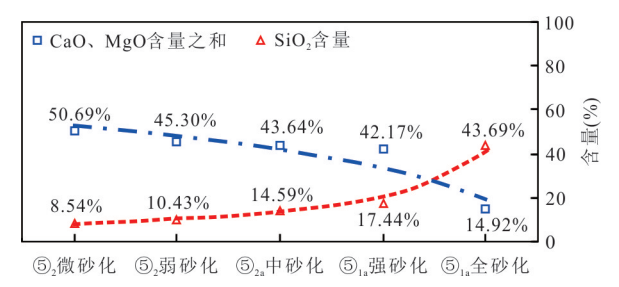


图6 主要化学成分含量随砂化程度变化
Fig.6 Content of main chemical components varying with sanding degree

3.4 砂化白云岩成因机理

综上所述,研究区内砂化白云岩及其不均性特征的成因机理,可以从“宏观构造动力作用”“细观矿物结构组成”“微观化学成分变迁”3个层面予以概括(图7)。

(1)在宏观层面,研究区位于3条断裂之间,且地层出现倒转现象,说明该区域在印支期所受的挤压应力及燕山期所受的张拉应力均非常强烈。这是研究区域内碳酸盐白云岩化及白云岩砂化程度强烈的宏观动力因素。燕山运动的张拉应力作用导致的张性断裂(裂隙)为该时期大量喷发的构造热液提供了流动通道,致使天兴洲条带碳酸盐白云岩化甚至砂化(硅化)异常强烈;同时,构造营力的作用,促使白云岩发生动力变质形成角砾碎屑和碎粒、碎粉,对岩石起胶结作用,并发育规模不等的裂隙和孔洞;一方面裂隙和孔洞的出现,增强了岩溶裂隙水的流动性,加快了碳酸盐岩的溶蚀淋失速度;另一方面胶结作用及硅化作用通常为破坏性成岩作用,降低了岩石物性(李峰峰等,2023)。以上两个方面的共同作用,又进一步促进了天兴洲条带白云岩的砂化(硅化)。

(2)在细观层面,白云岩矿物成分不纯、多样,且孔隙率高,这一方面为岩溶裂隙水提供了更好的流动通道,另一方面又使得白云岩的多样化矿物之间呈分散形态,从而导致差异溶蚀现象,此时方解石作为主要胶结物,结构连接相对较弱,首先被溶蚀并被岩石矿物碎粒、碎粉取代;同时,白云岩主要沿晶间孔或晶体结合面溶蚀分解及切性割崩解,在溶蚀过程中常伴有晶体的脱落,从而形成类似砂糖状白云岩砂颗粒乃至白云岩粉。

表3 各砂化程度时白云岩化学成分含量 (%)

Table 3 Statistical analysis of dolomite chemical components in different sanding degree (%)										
层号及名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	其他	烧失量
⑤ ₁ 全砂化	43.69	10.90	2.11	3.24	11.69	0.06	2.04	3.01	0.28	23.00
⑤ _{1a} 强砂化	17.44	0.14	0.26	7.52	34.65	0.05	0.01	0.03	0.00	39.90
⑤ _{2a} 中砂化	14.59	0.26	0.27	8.04	35.60	0.05	0.00	0.06	0.10	41.03
⑤ ₂ 弱砂化	10.43	0.17	0.33	8.87	36.43	0.06	0.01	0.07	0.00	43.63
⑤ _{2b} 微砂化	8.54	0.56	1.41	13.90	36.79	0.06	0.05	0.04	0.59	38.06
最大值	43.69	10.90	2.11	13.90	36.79	0.06	2.04	3.01	0.59	43.63
最小值	8.54	0.14	0.26	3.24	11.69	0.05	0.00	0.03	0.00	23.00
平均值	18.94	2.41	0.88	8.31	31.03	0.06	0.42	0.64	0.19	37.12

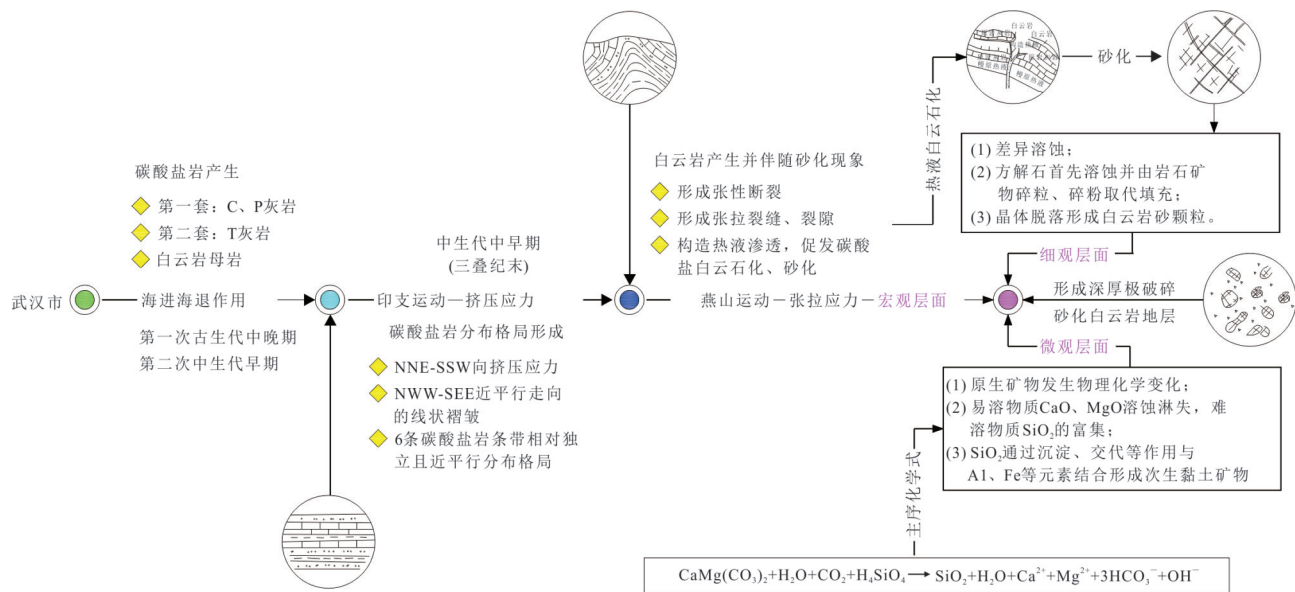


图7 白云岩砂化进程

Fig.7 Chart of dolomite sanding process

(3)在微观层面,白云岩砂化基本经历了构造热液作用、溶蚀、淋滤、沉淀、交代等过程,原岩中原生矿物(白云石、铁白云石等)发物理化学变化,释放出的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Si^{4+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子进入溶液被带走后,沉淀或交代形成新的次生矿物(石英石、高岭土等).其具体表现为:易溶物质 CaO 、 MgO 溶蚀淋失,难溶物质 SiO_2 的富集,至后期进入全砂化阶段后, SiO_2 主要通过沉淀、交代等作用与 Al 、 Fe 等元素结合形成次生黏土矿物,因此 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 等黏土矿物元素,在全砂化阶段后富集作用明显.上述过程的主序化学方程式为: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 3\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$.

4 工程特性研究

4.1 饱和单轴抗压试验分析

本次研究,除⑤₁层无法取样外,对“强—未”砂化程度的白云岩均取得岩样并分别实施了6组、15组、30组、15组、6组饱和单轴抗压试验(图8).

在统计时,将饱和单轴抗压强度标准值 $f_{rk} > 100 \text{ MPa}$ 的白云岩视为未砂化状态,其试验数据离散性很大,因此,在后续砂化白云岩单轴抗压强度指标分析时,没有将未砂化白云岩考虑在内,以确保数据的客观性和准确性.分析可知:(1)受砂化程度不均匀的影响,各岩层在宏观上表现为 f_{rk} 的区别,力学性质分明.(2)⑤_{1a}、⑤_{2a}、⑤_{2b}层均属透镜体夹层,

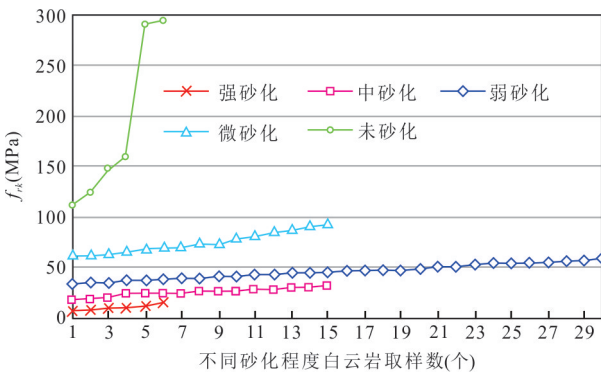


图8 不同砂化程度白云岩饱和单轴抗压强度试验值分布

Fig.8 Saturation uniaxial compressive value distribution of dolomite in different sanding degrees

若将其 f_{rk} 参与⑤₁或⑤₂层的参数统计并作为设计参数的取值依据,将造成⑤₁层或⑤₂层的参数取值产生偏差;若将⑤_{1a}及⑤_{2b}层的 f_{rk} 分别与⑤₁或⑤₂层共同统计,将造成参数取值偏大,危害工程安全;若将⑤_{2a}层的 f_{rk} 与⑤₂层共同统计,则会造成参数取值偏小,增加工程造价.(3)砂化阶段“微—弱、微—中、微—强”的白云岩饱和抗压强度降幅分别可达38.6%、68.1%、90.0%,可见,砂化对白云岩力学性质损伤很大.

岩体质量分级是地质工程设计与施工的重要依据,以岩体完整程度、岩体结构特征、结构面状态的统计分析为基础.对白云岩砂化程度进行宏观分级,可以定性分析岩溶砂化对岩体质量的影响(董

家兴等,2023,2024)。综上,对白云岩的砂化程度分级引入 f_{rk} 作为量化依据,并与岩石类别、岩体完整程度等相关指标实现对应关系,建立了具备岩石力学参数的“白云岩砂化程度划分表”(表4)。又进一步发现,随着砂化程度增大,岩石强度呈幂函数降低(图9):

$$f_{rk}=1.3\cdot I^{2.5},\tag{1}$$

式(1)中: $I=1、2、3、4、5$,表示由强到弱的砂化等级, $R^2=0.999$,以此拟合计算得到⑤₁全砂化白云岩的 $f_{rk}=1.3$ MPa。随后开展的 Hoek-Brown 强度准则

表 4 白云岩砂化程度分级

Table 4 Classification table of sandy dolomite

对应层号	⑤ ₁	⑤ _{1a}	⑤ _{2a}	⑤ ₂	⑤ _{2b}
砂化程度	全砂化	强砂化	中砂化	弱砂化	微砂化
砂化等级	1	2	3	4	5
岩石类别	极软岩	软岩	较软岩	较硬岩	坚硬岩
岩体完整程度	极破碎	破碎	较破碎	较完整	完整
f_{rk} 范围(MPa)	(0,5]	(5,15]	(15,30]	(30,60]	>60
标准值(MPa)	拟合值 1.3	7.0	22.5	43.3	70.5

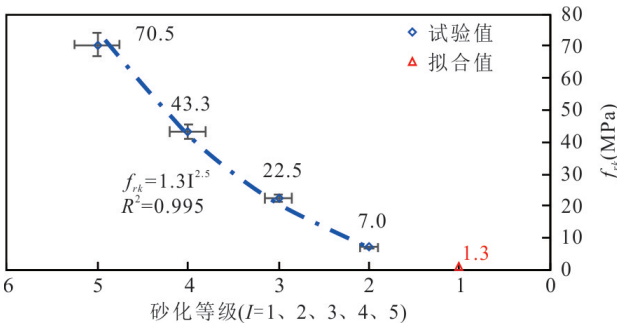


图 9 饱和单轴抗压强度与砂化等级的关系
Fig.9 Relation between saturated uniaxial compressive strength and sanding grade

理论计算及桩基原位测试工作,证明了该拟合值的准确性。

4.2 白云岩砂颗粒分析

从岩心上看,受完全砂化作用,⑤₁层岩心呈砂糖状颗粒,可视为白云岩砂;从力学性质上看,⑤₁层饱和单轴抗压强度可达 1.3 MPa,具有一定的地基承载力。粗粒土的工程性质,如透水性、压缩性和强度等,很大程度上取决于土的粒径级配(李广信等,2013)。为进一步摸清该层作为基础持力层的可行性,对⑤₁层的白云岩砂进行了颗粒分析试验。分析可知:全砂化状态的白云岩砂,其粒径大于 0.5 mm 的颗粒含量平均值为 71.9%,依据相关规范标准,应定名为粗砂(表5)。4 个扰动样的均匀系数 C_u 均大于 5,平均值为 16.6;曲率系数 C_c 仅一个大于 3,平均值为 2.82,介于 1~3。因此,全砂化状态的白云岩砂,级配不均匀($C_u>5$)且级配曲线连续($1<C_c<3$),说明级配良好(表6),因此该层作为基础持力层的可行性是存在的。

5 结论与展望

5.1 结论

针对研究区砂化白云岩成因以及砂化程度对白云岩工程特性的影响问题,采用构造调查、薄片鉴定、XRD 试验、XRF 试验、颗粒分析试验及饱和单轴抗压强度试验等多种方法,进行了深入研究与论证,结论如下。

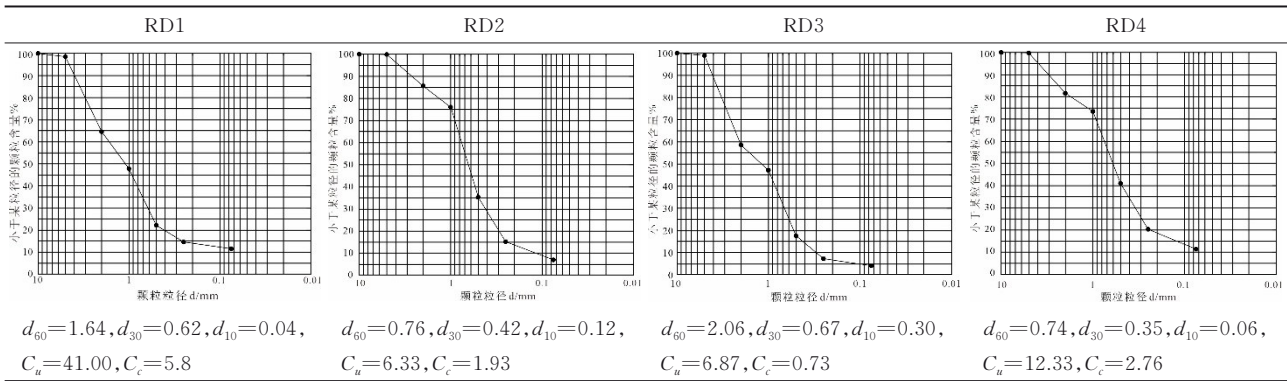
(1)研究区内砂化白云岩层可划分为⑤₁全砂化(极破碎—破碎)及⑤₂弱砂化(较破碎—较完整)两个大层,⑤_{1a}强砂化、⑤_{2a}中砂化、⑤_{2b}微砂化分别是其透镜体;⑤₁、⑤₂层厚度变化极大,规律不强,存在各向异性特征。

表 5 白云岩砂颗粒分试验统计

Table 5 Particle test statistics of dolomite sand

样品号	取样 深度(m)	颗粒级配占比							定名
		10.00~	5.00~	0.00~	1.00~	0.50~	0.250~	≤0.075 mm	
		5.00 mm	0.00 mm	1.00 mm	0.50 mm	0.25 mm	0.075 mm		
RD1	30.5~30.7	1.46%	34.02%	16.69%	25.71%	7.55%	3.04%	11.54%	粗砂
RD2	33.0~33.2	0.13%	14.23%	9.58%	40.72%	20.09%	8.26%	7.00%	粗砂
RD3	33.5~33.7	1.09%	40.32%	11.42%	29.61%	10.37%	3.15%	4.04%	粗砂
RD4	34.0~34.2	0.20%	18.21%	8.16%	32.40%	20.73%	8.94%	11.36%	粗砂
最大值	—	1.46%	40.32%	16.69%	40.72%	20.73%	8.94%	11.54%	—
最小值	—	0.13%	14.23%	8.16%	25.71%	7.55%	3.04%	4.04%	—
平均值	—	0.75%	26.89%	11.78%	32.48%	14.50%	5.90%	8.25%	—

表 6 白云岩砂颗粒级配曲线
Table 6 Particle grading curves of dolomite sand



(2)研究区内砂化白云岩及其不均性特征的成因机理,可以从“宏观构造动力作用”“细观矿物结构组成”“微观化学成分变迁”3个层面予以概括。

(3)在宏观层面,燕山运动的张拉应力作用导致的张性断裂(裂隙)为该时期大量喷发的构造热液提供了流动通道,致使天兴洲条带碳酸盐岩的白云岩化乃至砂化(硅化)异常强烈;同时,构造营力的作用,促使白云岩发生动力变质,加速了岩层的构造发育.在细观层面,白云岩的溶蚀过程,使方解石首先被溶蚀并被岩石矿物碎粒、碎粉取代;同时,白云岩主要沿晶间孔或晶体结合面溶蚀分解及切性割崩解,形成类似砂糖状白云岩砂颗粒乃至白云岩粉.在微观层面,白云岩砂化基本经历了构造热液作用、溶蚀、淋滤、沉淀、交代等过程,原岩中原生矿物发生物理化学变化,形成新的次生矿物。

(4)依据大样本岩石饱和单轴抗压强度试验数据统计结果,砂化阶段“微一弱、微一中、微一强”的白云岩饱和单轴抗压强度降幅分别达 38.6%、68.1%、90.0%,且呈幂函数降低的关系;由此,拟合得到⑤₁层全砂化极破碎白云岩的 $f_{rk}=1.3$ MPa,解决了全砂化白云岩难以制作标准岩样进行室内试验获取岩体力学参数的工程难题;随后开展的 Hoek-Brown 强度准则理论计算及桩基原位测试工作,证明了该拟合值的准确性。

(5)白云岩砂化程度由弱到强,在岩石结构上的演化特征为“完整—较完整—较破碎—破碎—极破碎”,在岩石强度上的演化特征为“坚硬—较硬—较软—软—极软”,在物质构成上的演化特征则为“白云岩—白云岩砂—白云岩粉—粉质黏土”.其具体的量化表现或影响就是岩石单轴抗压强度等力学指标的衰减.据此,对白云岩的砂化程度分级引

入量化依据,并与岩石类别、岩体完整程度等相关指标实现了对应关系,从而建立了具备岩石力学参数定量关系的“白云岩砂化程度分级表”。

5.2 展望

(1)本文只针对白云岩砂化对岩石单轴抗压强度的影响进行了相关研究,后期工作中将运用 Hoek-Brown 强度准则开展白云岩砂化对抗剪强度、桩基参数等影响研究。

(2)值得注意的是:⑤₁层的白云岩砂,级配良好.考虑到原位状态下的⑤₁全砂化白云岩,其岩体仍然具有一定强度,该层作为基础持力层的可行性是存在的.由于⑤₁全砂化白云岩厚度变化极大,若拟建大荷载建筑物采用桩基础,桩端非要穿透该层,无疑会造成桩长过长从而导致施工难度及成本大大增加;若要选取该层作为持力层,则桩基承载力在如此深厚极破碎岩石地层中的发挥机理、桩基参数的取值、最优桩型的控制等一系列问题都需要进一步论证,笔者将在今后工作中开展相关研究。

致谢:感谢编辑老师的认真审阅,感谢审稿专家提出的宝贵意见与建议!这些工作对本文质量得以提高起到了至关重要的作用!

References

Cui, J., 2009. Special Geological Environment of Bank Slope and Underground Engineering about Pingtuo Hydroelectric Station of Meigu River (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).

Davies, G. R., Smith, L. B. Jr., 2006. Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite Reservoir Facies: An Overview. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641—1690. <https://doi.org/10.1306/05220605164>

- Dong, J.X., Gong, X.Y., Mi, J., et al., 2024. Structure and Application of SHF Classification Method for Surrounding Rock of Sandy Dolomite Tunnel. *Earth Science*, 49(8): 2813—2825(in Chinese with English abstract).
- Dong, J.X., Shen, Z.L., Cao, L., et al., 2023. Water-Sand Inrush Risk Assessment Method of Sandy Dolomite Tunnel and Its Application in the Chenaju Tunnel, Southwest of China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2196369>
- Dong, J.X., Zhang, S.W., Cheng, J., et al., 2023. Application of Fuzzy AHP Method to Classification of Dolomite Sandification Level. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 40(2): 109—114, 123(in Chinese with English abstract).
- Guo, Y., Du, X.F., Yang, B., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Genesis of Upper Sinian-Lower Paleozoic Dolomite in Lower Yangtze Region: A Case Study from Nanjing Area. *Earth Science*, 48(12): 4558—4574(in Chinese with English abstract).
- He, W.X., 2008. Study of Genetic Mechanism about Dolomite Sandification in the Site Area of Pingtuo Hydroelectric Station of Meigu River and Its Influence on the Project (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Hu, X.B., 2009. Study of Dolomite's Karstic Sandification Characteristic and Mechanism in the Deep Bank Slope of Pingtuo Hydropower Station in Meigu River (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., Pei, X.J., Cui, S.H., 2016. Cataclastic Characteristics and Formation Mechanism of Rock Mass in Sliding Zone of Daguangbao Landslide. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Y.F., Zhou, F.C., Lin, J.Y., et al., 2023. Evolution Mechanism of Tunnel Water and Sand Inrush Considering Water-Rich Sandy Dolomite Hazard-Causing Structures. *Engineering Failure Analysis*, 153: 107554. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107554>
- Jiang, Y.F., Zhou, P., Zhou, F.C., et al., 2022. Failure Analysis and Control Measures for Tunnel Faces in Water-Rich Sandy Dolomite Formations. *Engineering Failure Analysis*, 138: 106350. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106350>
- Li, F.F., Ye, Y., Yu, Y.C., et al., 2023. Research Progress of Carbonate Rock Diagenesis. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(1): 170—190(in Chinese with English abstract).
- Li, G.X., Zhang, B.Y., Yu, Y.Z., 2013. Soil Mechanics (2nd Edition). Tsinghua University Press, Beijing(in Chinese).
- Li, R., Jiao, Y.Q., Wu, L.Q., et al., 2008. Structurally Controlled Hydrothermal Dolomitization: A New Model in International Carbonates Field. *Geological Science and Technology Information*, 27(3): 35—40(in Chinese with English abstract).
- Li, W.Q., Liu, H.C., Li, P.P., et al., 2023. Diverse Fluids in Dolomitization and Petrogenesis of the Dengying Formation Dolomite in the Sichuan Basin, SW China. *Earth Science*, 48(9): 3360—3377(in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Ma, T., Tan, X.C., et al., 2016. Origin of Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite in Epigenetic Karst System during Shallow Burial: An Example from Middle Permian Maokou Formation, Central Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(6): 916—927 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.B., Xing, F.C., Hu, H.R., et al., 2021. Multi-Origin of Dolomite in Lower Ordovician Tongzi Formation of Sichuan Basin, Western China. *Earth Science*, 46(2): 583—599(in Chinese with English abstract).
- Luo, X.J., 2013. On the History of Tectonic Evolution and Karstification in Wuhan. *Carsologica Sinica*, 32(2): 195—202 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X.J., 2015. Karst Abnormal Development and Origin of the Tianxingzhou Carbonate Rock Belt in the Wuhan Area. *Carsologica Sinica*, 34(1): 35—42(in Chinese with English abstract).
- Richter, D.K., Gillhaus, A., Neuser, R.D., 2018. The Alteration and Disintegration of Dolostones with Stoichiometric Dolomite Crystals to Dolomite Sand: New Insights from the Franconian Alb (Upper Jurassic, SE Germany). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft Für Geowissenschaften*, 169(1): 27—46. <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0150>
- Wang, P.P., Yao, J., Jiang, L., 2019. Sandification Characteristics of Guizhou Dolomite and the Influence on Tunnel Support Structure. *Journal of Guizhou University (Natural Sciences)*, 36(3): 44—48(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.J., Du, Y.W., Jiang, Y.F., et al., 2021. Study on the Mechanism of Instability of Tunnel Face in Sandy Dolomite Stratum. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(Suppl. 2): 3118—3126 (in Chinese with English abstract).
- Yao, T.T., Zhu, H.T., Yang, X.H., et al., 2020. Dolomite Origin of Shahejie Formation in Huanghekou Sag, Bohai

- Bay Basin. *Earth Science*, 45(10): 3567—3578 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. X., 2012. Formation Mechanism and Engineering Properties of Dolomite Karst Sandification(Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. X., Zhang, H. Q., Zhao, Q. H., et al., 2012a. Characteristics and Distribution of Dolomite Sandification at Pingtuo Hydropower Station. *Yangtze River*, 43(19):42—44, 78(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. X., Zhao, Q. H., Hu, X. B., et al., 2012b. Laboratory Dissolution Test on Dolomite and Its Micro-Dissolution Mechanism. *Journal of Engineering Geology*, 20(4): 576—584(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. C., Zhang, Y. X., Liu, W. L., et al., 2023. Controlled Blasting Technology of Small Section Tunnel in Medium Sanded Dolomite: Taking the Yuxi Section Tunnel of the Central Yunnan Water Diversion Project as an Example. *Science Technology and Engineering*, 23(29): 12663—12671 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, F. C., Li, J. Y., Jiang, Y. F., et al., 2023. Optimization of Radial Drainage Design for Water-Rich Tunnel in Sandy Dolomite Stratum Considering Pressure Relief Effect. *Structures*, 53: 861—881. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.110>
- ### 中文参考文献
- 崔杰, 2009. 美姑河坪头电站岸坡特殊地质现象与地下工程(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 董家兴, 龚欣月, 米健, 等, 2024. 砂化白云岩隧洞围岩分类方法 SHF 构建及应用. *地球科学*, 49(8): 2813—2825.
- 董家兴, 张晟玮, 程娟, 等, 2023. 模糊层次分析法在白云岩砂化等级划分中的应用. *长江科学院院报*, 40(2): 109—114, 123.
- 郭颖, 杜晓峰, 杨波, 等, 2023. 下扬子地区上震旦统一下古生界白云岩地球化学特征及成因: 以南京地区为例. *地球科学*, 48(12): 4558—4574.
- 何文秀, 2008. 美姑河坪头水电站厂址区白云岩砂化成因及其对工程影响研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 胡相波, 2009. 美姑河坪头水电站岸坡深部白云岩岩溶砂化特征及机理研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 黄润秋, 裴向军, 崔圣华, 2016. 大光包滑坡滑带岩体碎裂特征及其形成机制研究. *岩石力学与工程学报*, 35(1): 1—15.
- 李峰峰, 叶禹, 余义常, 等, 2023. 碳酸盐岩成岩作用研究进展. *地质科技通报*, 42(1): 170—190.
- 李广信, 张丙印, 于玉贞, 2013. *土力学*(第 2 版). 北京: 清华大学出版社.
- 李荣, 焦养泉, 吴立群, 等, 2008. 构造热液白云石化: 一种国际碳酸盐岩领域的新模式. *地质科技情报*, 27(3): 35—40.
- 李文奇, 刘汇川, 李平平, 等, 2023. 四川灯影组白云石化流体多样化特征及白云岩差异性成因. *地球科学*, 48(9): 3360—3377.
- 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等, 2016. 表生岩溶系统中浅埋藏构造—热液白云岩成因: 以四川盆地中部中二叠统茅口组为例. *石油勘探与开发*, 43(6): 916—927.
- 刘志波, 邢凤存, 胡华蕊, 等, 2021. 四川盆地奥陶统桐梓组白云岩多元成因. *地球科学*, 46(2): 583—599.
- 罗小杰, 2013. 试论武汉地区构造演化与岩溶发育史. *中国岩溶*, 32(2): 195—202.
- 罗小杰, 2015. 武汉地区天兴洲碳酸盐岩条带岩溶发育的异常性及其成因探讨. *中国岩溶*, 34(1): 35—42.
- 王朋朋, 姚静, 姜笠, 2019. 贵州白云岩砂化特征及其对隧道支护结构影响. *贵州大学学报(自然科学版)*, 36(3): 44—48.
- 王志杰, 杜逸文, 姜逸帆, 等, 2021. 砂化白云岩地层隧道掌子面失稳机制研究. *岩石力学与工程学报*, 40(S2): 3118—3126.
- 姚婷婷, 朱红涛, 杨香华, 等, 2020. 渤海湾盆地黄河口凹陷沙河街组白云岩成因机理. *地球科学*, 45(10): 3567—3578.
- 张良喜, 2012. 白云岩岩溶砂化形成机理及其工程特性研究: 以美姑河坪头水电站为例(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 张良喜, 张海泉, 赵其华, 等, 2012a. 四川坪头水电站白云岩砂化特征及发育分布规律. *人民长江*, 43(19): 42—44, 78.
- 张良喜, 赵其华, 胡相波, 等, 2012b. 某地区白云岩室内溶蚀试验及微观溶蚀机理研究. *工程地质学报*, 20(4): 576—584.
- 赵泽昌, 张翼翔, 刘万林, 等, 2023. 中等砂化白云岩小断面隧洞控制爆破技术: 以滇中引水工程玉溪段隧洞为例. *科学技术与工程*, 23(29): 12663—12671.