

四川龙门山地区阳新组灰岩地质特征及用途

刘 亮,韩洪明,杨鹏涛,杨宇东,戴 元,陈 娜,许 涛

四川省地质矿产局川西北地质队,四川 绵阳 621010

摘 要: 二叠系阳新组灰岩厚度 240~350 m,走向延伸大于 50 km,出露面积 15 km² 以上,资源储量极为丰富。研究区 0.6 km² 范围内资源量为 5193×10⁴ t。阳新组灰岩 CaO 含量 49.87%~55.74%, MgO 含量 0.24%~2.80%, SiO₂ 含量 0.38%~5.80%之间, SO₃ 含量 0.01%~0.40%, K₂O+Na₂O 含量 0.02%~0.12%,均达到 I 级水泥用料要求。饱和抗压强度 41.6~82.4 MPa,坚固性 1%~3%,压碎指标 8.2%~9.6%;所有指标均符合建筑石料用要求。对阳新组灰岩地质特征、物理化学指标的分析评价显示,其可广泛运用于水泥、建筑石料等领域,具有重要的经济价值和意义。

关键词: 阳新组灰岩;二叠系;建筑石料;龙门山;四川省

GEOLOGY AND UTILIZATION OF YANGXIN FORMATION LIMESTONE IN LONGMENSHAN AREA, SICHUAN PROVINCE

LIU Liang, HAN Hong-ming, YANG Peng-tao, YANG Yu-dong, DAI Yuan, CHEN Na, XU Tao

Northwest Sichuan Geological Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

Abstract: The limestone of Yangxin Formation, Permian, is 240–350 m thick with the strike extension more than 50 km, exposed area over 15 km² and abundant resource reserves. The resources is 51.93 Mt within a 0.6 km² range of the study area. In terms of the main chemical composition content in Yangxin Formation limestone, CaO is 49.87%–55.74%, MgO 0.24%–2.80%, SiO₂ 0.38%–5.80%, SO₃ 0.01%–0.40%, and K₂O+Na₂O 0.02%–0.12%, which all meet the requirements of grade-I material for cement. The saturated compressive strength of 41.6–82.4 MPa, firmness of 1%–3% and crushing index of 8.2%–9.6% all reach the required indexes of building stone. The analysis and evaluation on the geological characteristics and physical-chemical indexes of Yangxin Formation limestone show that it can be widely used in cement, building stone and other fields, and has important economic value and significance.

Key words: Yangxin Formation limestone; Permian; building stone; Longmenshan area; Sichuan Province

0 引言

随着“一带一路”和成渝经济圈的提出,成都平原城市群飞速发展,各地加大高速公路、铁路、地铁、机场等基础设施的建设,对水泥、建筑石料等矿产资源的需

求更加强烈。龙门山地区碳酸盐资源丰富,受到众多学者关注^[1-4],目前对该地区灰岩的研究利用多集中在石炭系和三叠系地层中,而对二叠系灰岩的研究评价不足,为此我们在江油含增一带对二叠系阳新组灰岩

收稿日期:2019-01-02;修回日期:2019-03-12。编辑:张哲。

基金项目:国家自然科学基金“川滇黔相邻地区地质矿产调查”项目(编号 1212010880704)。

作者简介:刘亮(1987—),男,硕士,工程师,主要从事区域地质、矿产地质调查研究工作,通信地址 四川省绵阳市涪城区剑门路西段 88 号,E-mail//liuliang2006ziyang@163.com

展开调查评价,以期为地方经济社会发展服务。

研究区位于龙门山中段前山带与川西北前陆盆地的结合部位^[5-6],距含增镇距离不到3 km,距江油不到6 km,有着便利的交通条件。含增-通口一带是传统优质水泥产地,周边有大量水泥生产企业,配套设施齐全。研究区0.6 km²范围内灰岩储量为5193×10⁴ t,远景可达1×10⁸ t以上。对其地质特征及用途研究有着重要的经济和现实意义。

1 区域地质概况

1.1 地质特征

研究区位于龙门山前缘推覆-冲断带(唐王寨推覆体)与四川陆盆的川西北前陆盆地交接部位(图1)。泥盆纪—三叠纪碳酸盐岩地层发育^[6]。

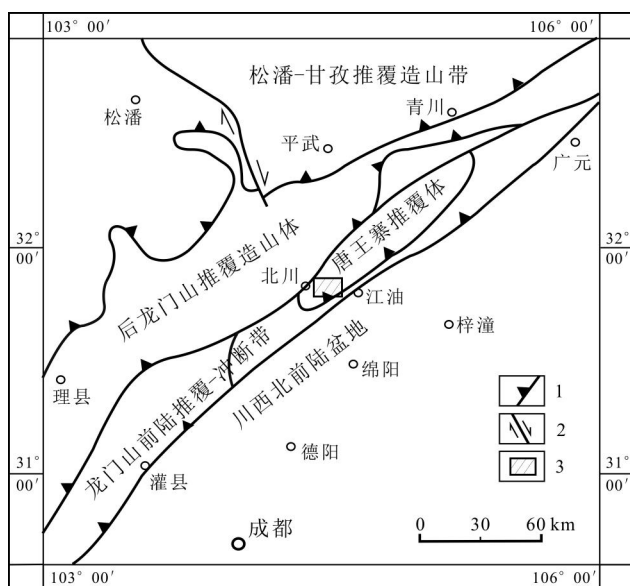


图1 研究区构造位置略图

(据文献[1]修改)

Fig. 1 Tectonic location sketch of the study area

(Modified from Reference [1])

1—推覆构造及分区界线(nappe structure and division boundary); 2—断裂(fault); 3—研究区位置(study area)

区域上出露地层为石炭系中统黄龙组(C_2h),二叠系中统阳新组(P_2y)、上统吴家坪组(P_3w),三叠系中统千佛崖组(J_2q)(图2)。由老到新简述如下:

1.1.1 石炭系中统黄龙组

黄龙组在北川一带厚约150 m,江油含增附近厚约120 m。其下部为浅灰、灰白色厚层粉-细晶砂屑灰

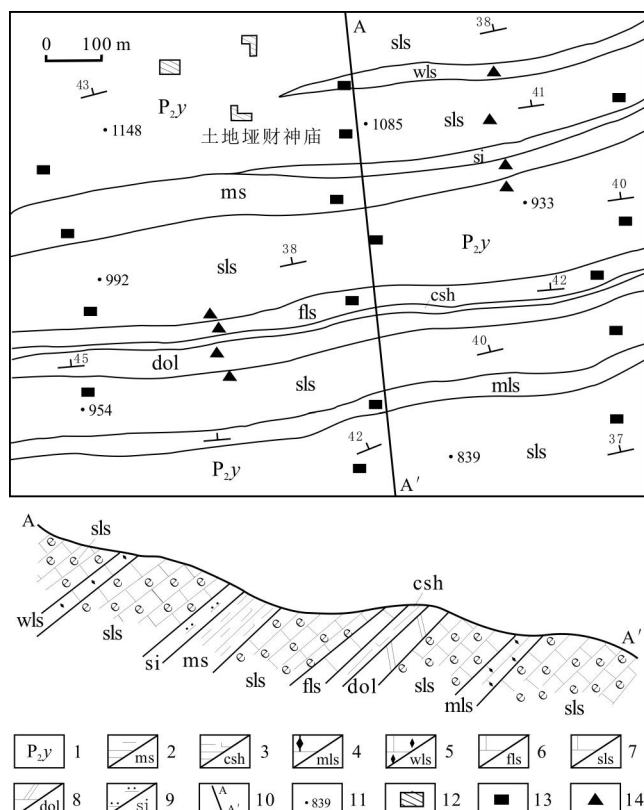


图2 二叠系中统阳新组灰岩地质略图

Fig. 2 Geological sketch map of Middle Permian Yangxin

Formation limestone

1—阳新组(Yangxin fm.); 2—泥岩(mudstone); 3—钙质页岩(calcareous shale); 4—泥晶灰岩(micrite); 5—微晶灰岩(microlite limestone); 6—粉晶灰岩 (powder crystal limestone); 7—生物碎屑灰岩 (bioclastic limestone); 8—白云岩(dolomite); 9—硅质岩(silicalite); 10—剖面位置 (profile position); 11—高程点 (elevation point); 12—建筑物 (building); 13—化学分析样品位置(position of geochemical sample); 14—物理力学样品位置(position of physical-mechanical sample)

岩、块状生物屑灰岩夹灰色薄层含粉砂质泥岩;中部为浅灰色厚层砾屑球粒灰岩、微晶砂屑灰岩,夹浅灰色块状细-粉晶白云质灰岩及深灰色厚层生物屑泥晶灰岩;上部为浅灰-灰白色厚层-块状粉-细晶砾屑灰岩、含生物屑砂屑灰岩,夹深灰色厚层含生物屑泥晶灰岩和灰白色薄层细粒石英砂岩。泥页岩中常见水平层理,灰岩中发育脉状层理、透镜层理和沙纹层、藻纹层理,显示了碳酸盐台地以清水为主的潮坪及台缘砂砾滩沉积环境。

1.1.2 二叠系中统阳新组

阳新组分布在北川-江油含增一带,呈北东向展布,区域上岩性相对稳定,属于碳酸盐开阔台地沉

积^[6-7],厚度240~350 m,走向延伸大于50 km,出露面积15 km²以上,超覆不整合于黄龙组之上、吴家坪组之下。根据岩性大致可分为上、下两个岩性段。

1)阳新组下段(P_2y^1):岩性为灰-棕灰色中厚-块状泥晶生物屑灰岩,含较多生物屑碎片化石,以苔藓虫、腕足、珊瑚等为主,蠕虫及有孔虫等化石较完整。

2)阳新组上段(P_2y^2):为灰-灰黑色中-厚层泥晶微晶生物屑灰岩夹多层砂砾屑微晶生物屑角砾灰岩和少量介壳灰岩、钙质页岩,中部和上部含有燧石条带及结核,含较多腕足、珊瑚、苔藓虫等化石。

1.1.3 二叠系上统吴家坪组

岩性为灰-深灰色中-厚层状微晶灰岩、生物碎屑灰岩、含燧石灰岩,底部为紫红、黄灰、灰白等杂色含粉砂质黏土岩、铝质黏土岩,其与下伏阳新组灰岩呈超覆不整合接触关系。地层中含较多腕足、蠕虫、珊瑚及菊石和海绵骨针等化石,属浅海陆棚沉积。该组之煤层为滨海沼泽-泥炭沼泽环境沉积物,其下之铝土矿和赤铁矿系湖相沉积。吴家坪组岩性相对稳定,厚度略有变化,一般在160~200 m,五一煤矿及茨竹垭等地厚达276~310 m。

1.1.4 三叠系中统千佛崖组

该组是干旱环境下山前河流-洪泛盆地沉积的紫红色复陆屑磨拉石建造。自下而上由砾岩-砂岩-粉砂岩-泥岩组成的正向不等厚半韵律结构相互重叠而生成,单个韵律厚度在5~20 m之间,韵律底部常由砂、砾岩组成,砾岩的砾石成分因流经不同地层和岩石而有差别,主要为石英岩或灰岩,分选、磨圆度均较差。砂岩中发育斜波状层理、平行层理和斜层理。下部砂页岩层面上分布较多碳化植物碎片,上部泥岩中富含钙、铁质结核或团块,局部密集成层。一般形成于水体注入少,甚或相对停止和蒸发速率较高的盆地环境中^①。

1.2 构造特征

从大地构造来看,研究区位于龙门山巨型逆冲推覆构造带-前陆推覆构造带。区域上存在一系列深断裂,走向北东,倾向北西,是三叠系末印支运动的结果,沿塑性地层滑动,喜马拉雅运动使构造进一步发展,形成现今的构造格局。岩层的走向、褶皱轴线以及主要断层的走向均为北东方向,与山体延伸的方向一致。

区域地质构造总体特点是,深断裂发育,褶皱紧密,地层出露较老,岩石基本未变质。

2 矿体及矿石特征

石灰岩矿赋存于二叠系阳新组,岩性为泥晶-微晶灰岩,含生物屑化石碎片较多。矿体大都呈中厚层状产出,矿体产状 $(290\sim 334)^\circ\angle(35\sim 45)^\circ$,呈单斜层状产出,走向北东,产出稳定,连续性、均匀性和完整性好。出露宽度205~300 m,总厚度274 m,出露标高821~988 m,高差168 m。矿界区域内,按开采底盘标高(+830 m)、边坡角 (55°) 形成的边界面、现状边坡面和风化层底界面等圈定一个石料矿体,初步估算阳新组灰岩储量为 5193×10^4 t,远景可达 1×10^8 t以上。

矿石为坚硬块状,可生产碎石、机制砂(人工砂)。研究区范围内除钙质页岩、泥岩外,无其他不能作建筑石料用的岩石夹层,无明显的相变、脉岩和强烈的岩石蚀变现象,岩石未遭受剧烈的构造破坏作用。

根据岩矿鉴定,矿石自然类型可分为生物碎屑粉晶-微晶灰岩、生物碎屑泥晶灰岩、细晶灰岩,以生物碎屑粉晶-细晶灰岩为主。

生物碎屑粉晶-微晶灰岩为灰-深灰色,粉晶-细晶结构,中-厚层状构造,具贝壳状断口。矿物成分由方解石、生物碎屑组成。方解石含量55%~70%,生物碎屑含量30%~45%。生物碎屑为介形虫、珊瑚、有孔虫、腕足、海百合等,由方解石充填,杂乱分布。

生物碎屑泥晶灰岩为灰-浅灰黄色,泥晶结构,薄-中层状构造。矿物成分有方解石、生物碎屑。方解石含量60%~70%,生物碎屑含量30%~40%,杂乱分布于方解石中。生物碎屑为介形虫、珊瑚、有孔虫、腕足、海百合等。

细晶灰岩为灰白色,岩石具细晶结构,厚层-块状构造。质纯,主要由方解石组成,零星见有少量呈星点状分布的金属矿物。方解石杂乱分布,无色,粒径0.06~0.25 mm为主,少量0.03~0.06 mm,不规则粒状,闪突起发育,高级白干涉色,茜素红染色为红色。

3 矿石用途及质量

3.1 水泥用灰岩质量

水泥用灰岩一直是地方经济发展不可或缺的资

①谢启兴,等. 1:25万广元市幅区域地质调查报告. 四川省地质调查院, 2013.

源,对其利用及评价已较成熟^[7-8].对于水泥用石灰质原料矿石化学成分的要求见表 1.

表 1 水泥用石灰质原料矿石化学成分一般要求
Table 1 General requirements for chemical compositions of limestone raw materials for cement

类别	CaO	MgO	K ₂ O+Na ₂ O	SO ₃	SiO ₂	
					石英质	燧石质
I 级品	≥48	≤3	≤0.6	≤1	≤6	≤4
II 级品	≥45	≤3.5	≤0.8	≤1	≤6	≤4

含量单位:%(质量分数).

本研究在剖面上共采集 15 件化学样品进行分析(图 2),分析结果见表 2. 15 件样品中, CaO 含量在 49.87%~55.74% 之间, 平均值 53.48%; MgO 含量 0.24%~2.80%,平均值 0.69%; SiO₂ 含量 0.38%~5.80%,平均值 1.66%; SO₃ 含量 0.01%~0.40%, 平均值0.11%, 小于 1%的质量要求; K₂O 含量 0.01%~0.09%,平均值

0.03%; Na₂O 含量 0.01%~0.03%,平均值 0.02%; K₂O+Na₂O 含量 0.02%~0.12%, 平均值 0.05%, 满足小于 0.8% 的要求; TFe₂O₃ 含量 0.05%~0.38%, 平均值 0.16%; Al₂O₃ 含量 0.05%~0.67%,平均值 0.28%. 所有化学组分均满足 I 类水泥用要求.

3.2 建筑石料用灰岩质量

灰岩作为建筑用石料已有不少研究^[9-12].当前石料的应用当中又以机制砂最为紧缺,随着天然砂石的日益减少以及受政策性环境保护,河道采砂被逐渐禁止,同时人工机制砂具有成分均匀、质量可靠、生产方式简单(破碎成相应规格即可)、成本低、绿色无污染的特点,机制砂的利用成为一种趋势,受到广泛关注.近期石料矿石价格甚至高过水泥用灰岩,有着广阔的利用空间和市场前景.石料质量指标要求依据《建设用卵石、碎石》(GB/T 14685—2011),具体工业指标要求见表 3.

表 2 阳新组灰岩主要化学组分分析结果表
Table 2 Main chemical composition analysis results of Yangxin Formation limestone

样品编号	岩性	CaO	MgO	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TFe ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	LOS
PM01-1HQ	含生物碎屑微晶灰岩	54.18	0.49	1.84	0.12	0.022	0.015	0.16	0.090	0.13	42.33
PM01-2HQ	含生物碎屑微晶灰岩	54.61	0.51	0.53	0.042	0.010	0.013	0.066	0.14	0.10	42.98
PM01-3HQ	生物碎屑微晶灰岩	52.88	0.35	2.25	0.038	0.029	<0.01	0.10	0.11	0.19	42.62
PM01-5HQ	生物碎屑细晶灰岩	52.83	2.80	0.63	0.034	<0.01	0.011	0.072	0.11	0.048	43.34
PM01-7HQ	生物碎屑微晶灰岩	53.70	0.70	1.54	0.087	0.056	0.025	0.27	0.05	0.67	42.60
PM01-8HQ	生物碎屑微晶灰岩	53.12	0.57	1.65	0.054	0.075	0.022	0.37	0.11	0.57	42.71
PM01-9HQ	生物碎屑微晶灰岩	55.74	0.32	0.53	0.01	<0.01	<0.01	0.060	0.11	0.14	42.92
PM02-2HQ	微晶灰岩	52.24	0.66	3.36	0.054	0.023	0.010	0.10	0.16	0.25	41.77
PM02-5HQ	生物碎屑微晶灰岩	54.33	0.58	0.92	0.067	0.014	0.015	0.048	0.07	0.12	43.23
PM02-6HQ	生物碎屑粉晶灰岩	54.65	0.42	0.38	0.17	0.010	<0.01	0.069	0.11	0.073	42.71
PM03-1HQ	生物碎屑粉晶灰岩	54.90	0.24	0.63	0.16	<0.01	<0.01	0.18	0.09	0.35	42.76
PM03-3HQ	生物碎屑微晶灰岩	54.07	0.45	1.22	0.12	0.045	0.018	0.15	0.09	0.25	43.03
PM03-4HQ1	生物碎屑微晶灰岩	52.56	0.76	1.79	0.40	0.094	0.027	0.38	0.11	0.41	42.61
PM03-5HQ	生物碎屑微晶灰岩	52.53	0.87	1.86	0.075	<0.10	0.025	0.21	0.09	0.61	42.68
PM03-6HQ	生物碎屑微晶灰岩	49.87	0.57	5.80	0.17	0.049	0.021	0.11	0.32	0.32	42.13
平均值		53.48	0.69	1.66	0.11	0.03	0.02	0.16	0.12	0.28	42.69
最小值		49.87	0.24	0.38	0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.05	0.05	41.77
最大值		55.74	2.80	5.80	0.40	0.09	0.03	0.38	0.32	0.67	43.34

测试单位:四川省地质矿产局川西北地质队岩矿测试中心. 含量单位:%.

表 3 石料质量一般要求

Table 3 General requirements for stone quality

指标项目	I 类	II 类	III 类	备 注
硫酸盐及硫化物(按 SO ₃ 质量计)/%	≤0.5	≤1.0	≤1.0	
坚固性(质量损失)/%	≤5	≤8	≤12	采用硫酸钠溶液法经 5 次循环后的质量损失
岩石抗压强度/MPa		≥30		立方体试件尺寸 50 mm × 50 mm × 50 mm;圆柱体试件尺寸 F 50 mm
碎石压碎指标/%	≤10	≤20	≤30	
碱集料反应	经集料碱活性检验(岩相法),骨料被评定为非碱活性时,作为最后结论.若评定为碱活性骨料或可疑时,作测试,在规定达到试验龄期的膨胀率应小于 0.10%			

3.2.1 岩石饱和抗压强度

石料的单轴饱和抗压强度是石料力学性质最重要的一项力学指标.本研究共采集 8 组样品(表 4),试件加工成立方体,尺寸 50 mm × 50 mm × 50 mm,经过自由浸泡 48 h 后,采用 YAW4206 全自动压力试验机(编号为 YT41)进行测试.阳新组灰岩单轴饱和抗压强度在 41.6~82.40 MPa 之间,平均值 55.89 MPa,均大于 30 MPa,满足建造石料用质量要求.

表 4 岩石饱和抗压强度分析结果表

Table 4 Saturated compressive strength analysis results of rocks

样品编号	地层	岩石名称	饱和抗压度/MPa
TDY-2KY	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	60.8
TDY-TC-00-KY	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	50.00
SDZ-4 KY1	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	60.77
SDZ-8KY1	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	82.40
TDY -5KY	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	41.6
TDY-TC-00-KY	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	53.1
SDZ-TC-01-YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	47.7
SDZ-TC-01-YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	50.8

测试单位:中国建筑材料工业地质勘查中心四川测试研究所.

3.2.2 碎石压碎指标

压碎指标表示石子抵抗压碎的能力,以间接地推测其相应的强度,用于衡量石料在逐渐增加的荷载下抵抗压碎的能力,是衡量石料力学性质的指标之一.本次共采集 8 组样品进行测试(表 5),碎石压碎指标值在 8.2%~9.6%之间,平均值 9.03%.样品碎石压碎指标均小于 10%,属 I 类建筑用石料.

表 5 碎石压碎指标分析结果表

Table 5 Crushing index analysis results of crushed stone

样品编号	地层	室内定名	压碎指标/%
TDY-2YS	P ₂ y	生物碎屑泥晶灰岩	8.8
TDY-TC-00-YS	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	8.2
SDZ-4YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	9.4
SDZ -8YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	9.6
TDY-5YS	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	8.5
TDY-TC-01-YS	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	9.6
SDZ-TC-01-YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	9.5
SDZ-TC-02-YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	8.6

测试单位:四川检正建筑质量检测有限公司.

3.2.3 坚固性(质量损失)

坚固性(质量损失)主要用于测定石料试样经饱和硫酸盐溶液浸泡与烘干循环后而不发生显著破坏或强度降低的性能.本次共采集 8 组样品(表 6),其值采用

表 6 坚固性分析结果表

Table 6 Rock firmness analysis results

样品编号	地层	室内定名	坚固性/%
TDY-2JG1	P ₂ y	生物碎屑泥晶灰岩	1
TDY-TC-00-YS	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	1
SDZ-4 KY1	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	3
SDZ-8KY1	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	2
TDY-5JG1	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	2
TDY-TC-01-YS	P ₂ y	生物碎屑微晶灰岩	2
SDZ-TC-01-YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	2
SDZ-TC-02-YS	P ₂ y	生物碎屑粉晶灰岩	3

测试单位:四川检正建筑质量检测有限公司.

硫酸钠溶液法经5次循环后的质量损失。样品坚固性测试结果为1%~3%,平均值2%,均小于5%,满足Ⅰ类建筑石料用要求。

4 结论

阳新组灰岩出露面积在15 km²以上,研究区0.6 km²范围内储量为5193×10⁴ t,远景可达1×10⁸ t以上,资源储量丰富,合理的开发利用可以为地方经济提供支撑。

15件灰岩样品中,CaO平均含量53.48%,MgO平均含量0.69%,SiO₂平均含量1.66%,SO₃平均含量0.11%,K₂O+Na₂O平均含量0.05%,TFe₂O₃平均含量0.16%,Al₂O₃平均含量0.28%。所有化学组分均满足Ⅰ类水泥用要求。

8组灰岩样品的物理力学指标显示,灰岩饱和抗压强度均值为55.89 MPa,坚固性(质量损失)均值为2%,压碎指标均值9.03%。各类指标变化系数小,均符合建筑石料用要求。坚固性和压碎指标可达到Ⅰ类建筑石料用要求,尤其是机制砂的应用前景广阔。

参考文献:

[1]易运昭,贾疏源,冯先智,等.川南地区深部阳新统灰岩岩溶缝洞系

统的发育特征[J].中国岩溶,1988(s2):186-192.

[2]张继庆.四川盆地及邻区晚二叠世生物礁[M].成都:四川科学技术出版社,1990.

[3]王运生,金以钟.四川盆地二叠统白云岩及古岩溶的形成与峨眉地裂运动的关系[J].成都理工学院学报,1997,24(1):8-16.

[4]翟文亮.龙门山甘溪地区泥盆系碳酸盐与陆源碎屑混合沉积特征[J].地质学报,2017,41:230-238.

[5]杨伟.川西北马角坝实习基地泥盆系—三叠系碳酸盐岩沉积环境研究[D].成都:成都理工大学,2009.

[6]四川省地质矿产局.四川省区域地质志[M].北京:地质出版社,1991.

[7]何益,张成江.都江堰张家山水泥用石灰岩矿地质特征及经济价值[J].四川地质学报,2015(1):80-82.

[8]叶志远,熊军,李力生,等.DZ/T0213-2002,冶金、化工石灰岩及白云岩、水泥原料矿产地地质勘查规范[S].北京:中国标准出版社,2002.

[9]郑平,姚征.绍兴县洞桥建筑石料矿床特征及开采技术条件分析[J].中国非金属矿工业导刊,2016,124(4):26-27,52.

[10]赵云川,刘波,杨德武.四川省南江县东榆镇耳子山建筑用石料矿床地质特征及开采技术条件研究[J].四川有色金属,2015(2):37-39.

[11]叶立鑫.试谈普通建筑石料矿产地地质勘查及技术方法[J].中国非金属矿工业导刊,2018(1):1-24.

[12]刘亮,赖华,杨鹏涛,等.川西北地区茅坝组灰岩地质特征及用途探讨[J].矿业工程研究,2019,34(1):55-61.

(上接第486页/Continued from Page 486)

[7]姚绍萍,徐荣华,晏俊灵.重力勘探法在侵入岩体导矿构造上的分析应用[J].地球物理学进展,2012,27(4):1679-1686.

[8]宋旭峰,曹涛,付彦平.高精度重力法精确圈定磨憨地下盐体范围[J].云南地质,2012,31(2):233-237.

[9]宋景明,金凤鸣,王玉青.二连盆地重磁异常地质意义及上古生界结构认识[J].石油地球物理勘探,2012,47(增刊):140-147.

[10]黄宗理,严加永.中国剩余重力异常与金属矿分布关系研究[J].地球学报,2011,32(6):652-658.

[11]王亮,张应文,刘盛光.区域重磁资料圈定贵州境内侵入岩体及局

部地质构造[J].物探与化探,2009,33(3):245-255.

[12]王亮,张应文,龙超林.贵州中东部剩余重力异常与区域矿产分布关系[J].物探与化探,2008,32(2):116-125.

[13]涂广红,江为为,朱东英.中国东北地区剩余重磁异常特征与地质构造及成矿带的关系[J].地球物理学进展,2006,21(3):746-755.

[14]窦喜英,吴燕冈,王恩利.重磁对应分析方法在东北地区实际资料处理中的应用[J].吉林地质,2006,25(2):42-47.

[15]张春林,陈维君,邱世琦.环状剩余重力异常及其找矿意义[J].地质与勘探,1984,20(5):49-52.