贵州主要岩石地层热物性参数特征及影响因素分析

宋小庆[1,2)]，江明[1,2)]，彭钦[1,2)]，熊沛文[1,2)]

1)贵州地质工程勘察设计研究院，贵阳，550008；2)贵州省地质矿产勘查开发局111地质大队，贵阳，550000)

内容提要：岩石热物性是地表、地球内部温度分布及热传递研究不可缺少的参数，贵州乃至西南地区均尚未开展过系统性、区域性的岩石热物性参数研究工作。为给贵州及相邻区域开展地热、油气成藏以及岩土工程等研究工作提供依据和参考，本次采集了贵州主要地层的14种岩类，共计433件岩石样品，并进行热导率、比热容及热扩散率的测试，分析了不同岩石的热物性参数特征及影响因素。研究表明：贵州地区岩石热导率的实测平均值在1.516±0.264～5.066±0.521W/(m·K)之间，比热容的实测平均值在0.272±0.042～0.603±0.096kJ/(kg·℃)之间，热扩散系数的实测平均值在0.752±0.331～2.854±0.368mm^2/s之间。区内岩石热物性与其矿物成分、结构、含水量等因素有关，其中，岩石年龄越老，热导率和热扩散系数越高；岩石的热导率和热扩散系数与高热导率矿物含量存在正相关关系，而比热容则相反；随着岩石中矿物颗粒粒度的增大，岩石热导率和热扩散系数也随之增加，而比热容与矿物颗粒粒度的关系则不明显；含水量对岩石的热物性影响较大，饱水条件下岩石的热导率比干燥条件下的热导率增加幅度在2%～17%，热扩散系数增加的幅度集中在1%～16%，而比热容则减少，减少幅度在3.08%～21.79%。

关键词：热导率；比热容；热扩散系数；影响因素；岩石；贵州

岩石热物性主要是指岩石的热导率、热扩散系数、比热容以及放射性生热率等物理性质，是表征岩石热物理性质的重要指标(Xu Zhenzhang，1992)。岩石的热物性质直接影响到地球内部各个圈层间岩石的热生成、储存和传递，是地表、地球内部温度分布及热传递研究不可缺少的参数(Wang Jiyang et al.，2015；Wang Jiyang et al.，2015；Vila et al.，2010；Zhou Yang et al.，2017；Liu Shaowen et al.，2006)。此外，在地源热泵设计(Yu mingzhi et al.，2001；Hu Pingfang et al.，2008；Wang Wanli et al.，2017)以及隧道、地铁等地质工程中，也需要利用热物性参数来评价地源热泵系统热交换器和隧道、地铁围岩与地质体之间的热交换(Li xianglan et al.，2015；Kwon et al.，2011)。

近30年来，国内学者开展了与油气、地热等相关的区域性岩石热物性研究工作，涉及中国西北、华北及东南等地(Qiu Nansheng，2002；Lei Xiaodong et al.，2018；Song Ning et al.，2011；Xiong Liangping et al.，1994；Lun Xiwu et al.，2002；Yang Shuzhen et al.，1993)，但未见贵州乃至西南地区的研究报道。本次选择贵州主要地层，通过岩石露头采集433件岩石样品进行热导率、热扩散率以及比热容的测试，并分析了不同岩性岩石以及不同时代地层岩石的热物性参数特征，测试结果将贵州及其相邻区域开展地热、油气成藏以及岩土工程等研究工作提供基础数据。

1 研究区地质概况

贵州地处祖国西南部，大地构造上属羌塘—扬子—华南板块—扬子陆块。区内地层发育齐全，自新元古界至第四系均有出露，是我国沉积地层发育最全的地区之一。贵州各时代地层在空间分布上具有较强的规律性(图1)，新元古界大面积分布于黔东南的黎平、从江、榕江等地及黔东北的梵净山地

注：本文为贵州省地矿局地质科研项目(黔地矿科合[2015]10)；国家科技支撑计划(2014BAB03B03)资助的成果。
收稿日期：2018-10-24；改回日期：2018-10-24；网络发表日期：2019-03-18；责任编辑：黄敏。
作者简介：宋小庆(1986－)，男，高级工程师，主要从事地下水与地热能研究。Email：376109559@qq.com。通讯作者：江明(1966－)，女，高级工程师，主要从事环境地质、工程地质等研究。Email：751379394@qq.com。

引用本文：宋小庆，江明，彭钦，熊沛文. 2019. 贵州主要岩石地层热物性参数特征及影响因素分析，93(8)：2092～2103，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019116.
Song Xiaoqing，Jiang Ming，Peng Qin，Xiong Peiwen. 2019. Thermal property parameters and influencing factor analysis of main rock strata in Guizhou province. Acta Geologica Sinica，93(8)：2092～2103.

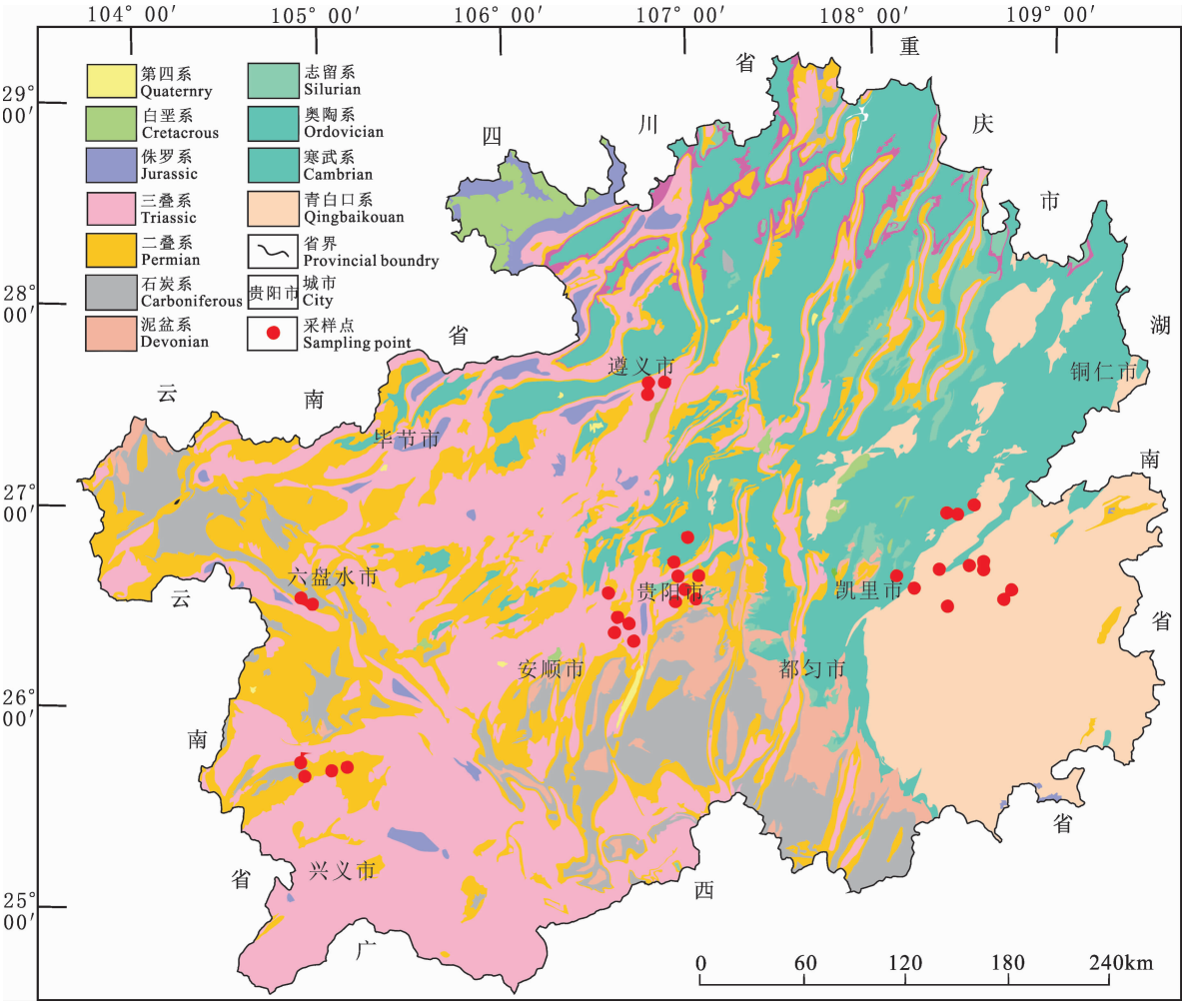

图 1　贵州岩石地层分布及取样点布置图(底图据戴传固等,2017)

Fig. 1　Characteristics of stratum lithology in Guizhou province and the distribution of sampling points (after Dai Chuangu et al. ,2017)

区,主要为变质岩类地层;下古生界主要分布在黔东、黔北、黔中地区,尤以黔东和黔北分布最广,分布面积最大的为寒武系地层,岩性以白云岩为主;上古生界主要分布在黔南、黔西北地区,以灰岩为主,几乎全为生物灰岩及生物屑灰岩,并有一定数量的礁灰岩,白云岩见于泥盆系高坡场组和石炭系摆佐组;三叠纪主要分布在黔西南、黔中及黔北地区,除顶部部分为灰岩外,其余多为白云岩,各组段白云岩均有向上粒度变粗、层次变厚倾向;侏罗系及白垩系主要布露于黔北的赤水、习水境内,侏罗系以及赤水—习水一带的白垩系主要为陆相红色岩系,其他区域白垩系则由砾岩和红色岩系组成(Dai Chuangu et al. ,2017)。

2　样品采集与测试

本次共采集了包括白垩系(E)至青白口系(Pt)共 9 个系别 18 个组共 433 件样品,基本涵盖贵州出露地层岩石的主要类型,包括灰岩、泥灰岩、白云岩、泥质白云岩、石英砂岩、页岩、泥岩、粉砂岩、炭质页岩、砾岩、玄武岩、凝灰岩、板岩及变余砂岩。其中,前 7 种类包括了多个地层时代的岩石,后面 7 种为单一地层时代岩石。为保证测试数据的代表性和可靠性,此次在同一种地层岩石中均采取 6 件以上进行测试。采样点分布于贵阳市、遵义市、六盘水市、普安县、凯里市以及镇远县等地(图 1)。

本次测定的岩石热物性参数包括热导率、热扩散系数和比热容,其中,除泥岩、页岩仅进行干燥状态下的热物性参数测试外,其他岩石均分干燥和饱水两种状态进行测定。采集岩石样品由山东建筑大学教育部可再生能源建筑利用技术重点实验室加工,并进行室内热物性测试。测试的仪器为瑞典生产的 Hot Disk(型号:TPS 2500S)热常数分析仪,测

量原理是基于 Silas Gustafsson 提出的瞬态平面热源法，该测试仪器和测定方法已成功应用于一些岩石热物性参数测试的研究中(Lü Chao et al.，2017；Chen Zhenming et al.，2016；Lü Chao et al.，2017)。测量岩块时，探头被夹在两个样品之间，测试时探头作为加热试样的热源进行加热，在设定时间内，记录试样温度随时间的变化，由镍金属随温度而变化的电阻值来显示所测试的温度变化，然后经由仪器进行计算分析获得被测试样的热物性参数。仪器测试范围为热导率 0.01～400 W/(m·K)、热扩散率 0.1～100 mm^2/S、比热容≤ 5MJ/(m^3·K)，测试精度为<±2%。

3 结果分析

3.1 岩石热导率

贵州岩石(干燥)的热导率值大多数在 2.0～5.0 W/(m·K)之间(表 1)，其中，实测平均值在 1.516±0.264～5.066±0.521W/(m·K)间，最大值为 5.828W/(m·K)，最小值为 1.033 W/(m·K)。

岩石热导率受矿物成分、结构、孔隙度、含水量、温度以及压力等的影响。不考虑地层时代因素，按岩石类型，将本次测试的岩石样归并为 14 类热导率(干燥)从大到小依次是白云岩 4.54±0.823W/(m·K)、石英砂岩 3.932±0.805W/(m·K)、砾岩 3.438±0.809W/(m·K)、粉砂岩 3.362±0.536W/(m·K)、凝灰岩 3.355±0.378W/(m·K)、泥质白云岩 3.182±1.213W/(m·K)、板岩 3.04±0.488W/(m·K)、变余砂岩 2.909±0.433W/(m·K)、灰岩 2.868±0.256W/(m·K)、泥灰岩 2.699±0.259W/(m·K)、页岩 2.021±0.575W/(m·K)、炭质页岩 2.213±0.0.202W/(m·K)、玄武岩 2.084±0.055W/(m·K)、泥岩 1.806±0.326W/(m·K)。白云岩、石英砂岩、砾岩及泥质白云岩的热导率变化幅度较大(图 2)，标准偏差均大于 0.8W/(m·K)，这主要是由于这些岩石多属于不同地层时代，且结构差异和矿物成分比例不同等因素所致，其他岩石的热导率变化幅度较小，标准偏差介于 0.055～0.575W/(m·K)之间。

表 1 贵州地区岩石热导率统计表

Table 1 Rock thermal conductivity statistics table in Guizhou area

地层		岩性	样品数(块)	干燥样		饱水样	
				范围[W/(m·K)]	均值±标准偏差[W/(m·K)]	范围[W/(m·K)]	均值±标准偏差[W/(m·K)]
白垩系		泥岩	16	1.142～2.100	1.795±0.263	—	—
		砾岩	29	2.152～5.581	3.438±0.810	2.742～5.354	3.593±0.646
侏罗系自流井群		粉砂岩	30	2.424～4.733	3.362±0.536	2.401～4.870	3.900±0.671
		石英砂岩	10	2.467～4.796	3.602±0.736	2.375～4.925	4.123±0.668
三叠系	花溪组	白云岩	15	2.750～4.732	3.553±0.621	2.860～4.514	3.517±0.629
		泥质白云岩	15	1.394～2.934	2.151±0.389	2.310～3.666	2.924±0.335
	安顺组	白云岩	15	3.156～5.026	4.473±0.499	2.338～5.909	4.423±0.664
		泥质白云岩	13	3.365～5.446	4.373±0.590	4.156～6.044	4.985±0.627
	夜郎组	泥岩	15	1.900～2.265	2.106±0.096	—	—
	大冶组	灰岩	15	2.737～2.782	2.650±0.105	2.550～2.854	2.730±0.079
		泥灰岩	10	2.162～2.779	2.562±0.153	2.341～2.802	2.581±0.142
二叠系	长兴组	泥岩	15	1.119～2.189	1.516±0.264	—	—
	峨眉山	玄武岩	30	1.984～2.202	2.084±0.055	1.686～2.271	2.077±0.100
	茅口组	灰岩	15	2.815～3.579	3.085±0.161	2.961～3.990	3.168±0.258
石炭系大唐组		石英砂岩	10	2.850～5.410	3.736±0.731	3.912～5.901	4.554±0.526
		泥灰岩	7	2.420～2.870	2.547±0.139	2.052～2.573	2.451±0.167
		页岩	15	1.033～2.763	1.729±0.482	—	—
泥盆系蟒山组		石英砂岩	10	2.984～5.270	4.458±0.666	3.916～6.294	5.017±0.713
志留系高寨田组		泥灰岩	11	2.542～3.439	2.920±0.238	2.707～3.413	2.985±0.179
寒武系	娄山关群	白云岩	30	3.582～5.828	5.066±0.521	3.257～6.091	5.210±0.669
	明心寺组	页岩	11	1.323～2.769	2.419±0.437	—	—
	牛蹄塘组	炭质页岩	6	1.779～2.367	2.123±0.202	1.877～2.412	2.236±0.818
青白口系		凝灰岩	30	2.599～4.258	3.355±0.378	2.003～4.390	3.303±0.494
		板岩	30	1.847～4.061	3.041±0.488	2.127～4.162	3.171±0.442
		变余砂岩	30	2.121～3.952	2.910±0.378	2.047～3.903	3.030±0.419

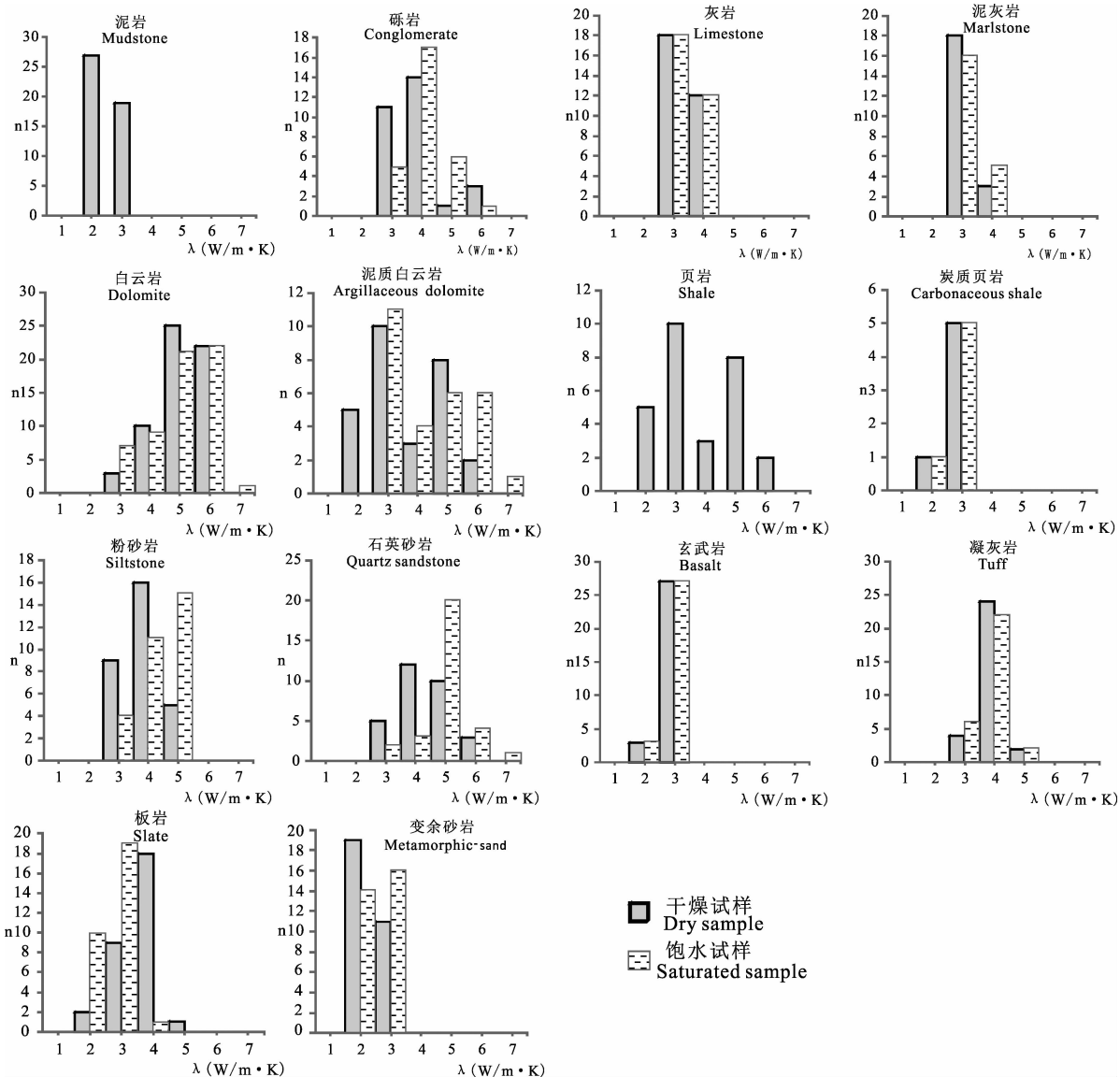

图 2　贵州地区岩石热导率分布直方图

Fig. 2　Histograms of thermal conductivities in Guizhou area

贵州地区分布最广的白云岩、灰岩、泥岩和粉砂岩的热导率值与华北(Chen Moxiang et al.,1988)、西北(Wang Jun et al.,1995)及东南(Xiong Liangping et al.,1994)地区同类岩石的热导率值对比(表 2)表明,贵州地区白云岩、灰岩和泥岩的热导率与华北地区岩石的热导率十分接近,差值小于10%,而与西北和东南地区岩石的热导率差异较大,其中白云岩热导率明显高于西北和东南地区,泥岩和灰岩则低于西北、东南地区。

3.2　岩石比热容

贵州地区岩石的比热容(干燥)变化范围在 0.174～0.873 kJ/(kg·℃)(表 3),其中,实测平均值在 0.272±0.042～0.603±0.096kJ/(kg·℃)间,最大值为 0.873 kJ/(kg·℃),最小值为 0.174 kJ/(kg·℃)。比热容平均值从大到小依次是玄武岩 0.603±0.096kJ/(kg·℃)、砾岩 0.566±0.192kJ/(kg·℃)、白云岩 0.553±0.082kJ/(kg·℃)、泥灰岩 0.545±0.057kJ/(kg·℃)、凝灰岩 0.528±0.085kJ/(kg·℃)、灰岩 0.515±0.079kJ/(kg·℃)、变余砂岩 0.502±0.069kJ/(kg·℃)、泥岩 0.493±0.126kJ/(kg·℃)、板岩 0.487±0.099kJ/(kg·℃)、泥质白云岩 0.454±0.106kJ/(kg·℃)、页岩 0.411±0.087kJ/(kg·℃)、炭质页岩 0.388±0.077kJ/(kg·℃)、石英砂岩 0.368±0.069kJ/(kg·℃)、粉砂岩 0.272±0.042kJ/(kg·℃)。从图 3 来看,区内比热容数据的分布多呈正态分布,其中泥岩、砾岩的变化范围较大,其他岩石的热扩散系数变化范围较小。

表 2 其他地区岩石热导率对比统计表

Table 2 Comparison of rock thermal conductivity statistics in other regions

岩性	华北地区(陈墨香等,1988)		西北地区(王钧等,1995)		东南地区(熊亮萍等,1994)	
	热导率值[W/(m·K)]	样品数(块)	热导率值[W/(m·K)]	样品数(块)	热导率值[W/(m·K)]	样品数(块)
泥岩	1.97±0.16	3	2.506±0.688	26	3.59±0.1.19	49
粉砂岩	2.51±0.71	17	1.811±0.578	21	—	—
白云岩	4.34±1.33	45	3.501±0.922	4	3.30±0.67	8
灰岩	2.86±1.13	21	3.192±0.724	28	3.33±0.56	56

表 3 贵州地区岩石比热容统计表

Table 3 Statistics of rock specific heat capacity in Guizhou area

地层		岩性	样品数(块)	干燥样		饱水样	
				范围[kJ/(kg·℃)]	均值±标准偏差[kJ/(kg·℃)]	范围[kJ/(kg·℃)]	均值±标准偏差[kJ/(kg·℃)]
白垩系		泥岩	16	0.174～0.567	0.427±0.124	—	—
		砾岩	29	0.293～0.873	0.566±0.116	0.200～0.669	0.470±0.111
侏罗系自流井群		粉砂岩	30	0.180～0.376	0.272±0.042	0.112～0.446	0.259±0.081
		石英砂岩	10	0.179～0.459	0.327±0.078	0.185～437	0.276±0.064
三叠系	花溪组	白云岩	15	0.401～0.637	0.553±0.055	0.324～0.654	0.523±0.078
		泥质白云岩	15	0.309～0.514	0.415±0.059	0.375～0.553	0.464±0.046
	安顺组	白云岩	15	0.491～0.673	0.589±0.047	0.286～0.662	0.492±0.109
		泥质白云岩	13	0.238～0.821	0.499±0.128	0.275～0.521	0.414±0.077
	夜郎组	泥岩	15	0.364～0.585	0.511±0.063	—	—
	大冶组	灰岩	15	0.303～0.636	0.511±0.092	0.375～0.597	0.492±0.061
		泥灰岩	10	0.449～0.705	0.560±0.067	0.279～0.525	0.451±0.082
二叠系	长兴组	泥岩	15	0.256～0.729	0.549±0.145	—	—
	峨眉山	玄武岩	30	0.409～0.68	0.603±0.096	0.237～0.698	0.572±0.114
	茅口组	灰岩	15	0.309～0.601	0.518±0.065	0.320～0.688	0.501±0.084
石炭系大唐组		石英砂岩	10	0.361～0.524	0.413±0.048	0.219～0.432	0.323±0.068
		泥灰岩	7	0.482～0.567	0.532±0.028	0.433～0.587	0.491±0.049
		页岩	15	0.249～0.535	0.393±0.095	—	—
泥盆系蟒山组		石英砂岩	10	0.285～0.466	0.370±0.047	0.136～0.434	0.299±0.093
志留系高寨田组		泥灰岩	11	0.401～0.610	0.551±0.057	0.403～0.585	0.506±0.057
寒武系	娄山关群	白云岩	30	0.322～0.689	0.535±0.099	0.278～0.654	0.459±0.101
	明心寺组	页岩	11	0.313～0.533	0.433±0.068	—	—
	牛蹄塘组	炭质页岩	6	0.219～0.441	0.388±0.077	0.289～0.452	0.393±0.063
青白口系		凝灰岩	30	0.321～0.699	0.557±0.093	0.329～0.692	0.528±0.085
		板岩	30	0.232～0.605	0.487±0.099	0.308～0.611	0.472±0.080
		变余砂岩	30	0.287～0.603	0.502±0.069	0.298～0.745	0.478±0.091

3.3 岩石热扩散系数

贵州地区岩石的热扩散系数(干燥)多在 1.0～3.0mm²/s 之间(表 4),实测平均值在 0.752±0.331 ～ 2.854 ± 0.368mm²/s 间,最大值为 4.23mm²/s,最小值为 0.418mm²/s。其中白云岩和含 SiO_2 的碎屑岩类热扩散系数多在 2.0～3.0mm²/s,较其他岩石高,这主要是由于白云石和石英的热导率高(Birch et al.,1948; Beck et al.,1977),而热扩散系数与热导率成正比的原因所致。泥岩和页岩的热扩散系数多小于 1.0mm²/s,是区内热扩散系数最低的岩类,其他岩石的热扩散系数介于 1.0～2.0mm²/s 间。从图 4 可知,研究区内白云岩、泥质白云岩、粉砂岩和石英砂岩的热扩散系数变化范围较大,其他岩石的变化范围较小,这可能与岩石的孔隙率有关。

4 讨论:影响岩石热物性参数的因素分析

4.1 地层年龄

同一岩类,地层年代不同,岩石的热物性参数也有所差异。研究区大部分岩石的热导率与地层年龄存在岩石年龄越老,热导率越高的关系,与栾锡武(2002)、邱楠生(2002)研究的结果相同。如侏罗系石英砂岩的热导率为 3.602±0.736 W/(m·K),到石炭系时石英砂岩热导率为 3.736 ± 0.731W/(m·K),泥盆系时石英砂岩热导率为 4.458 ±

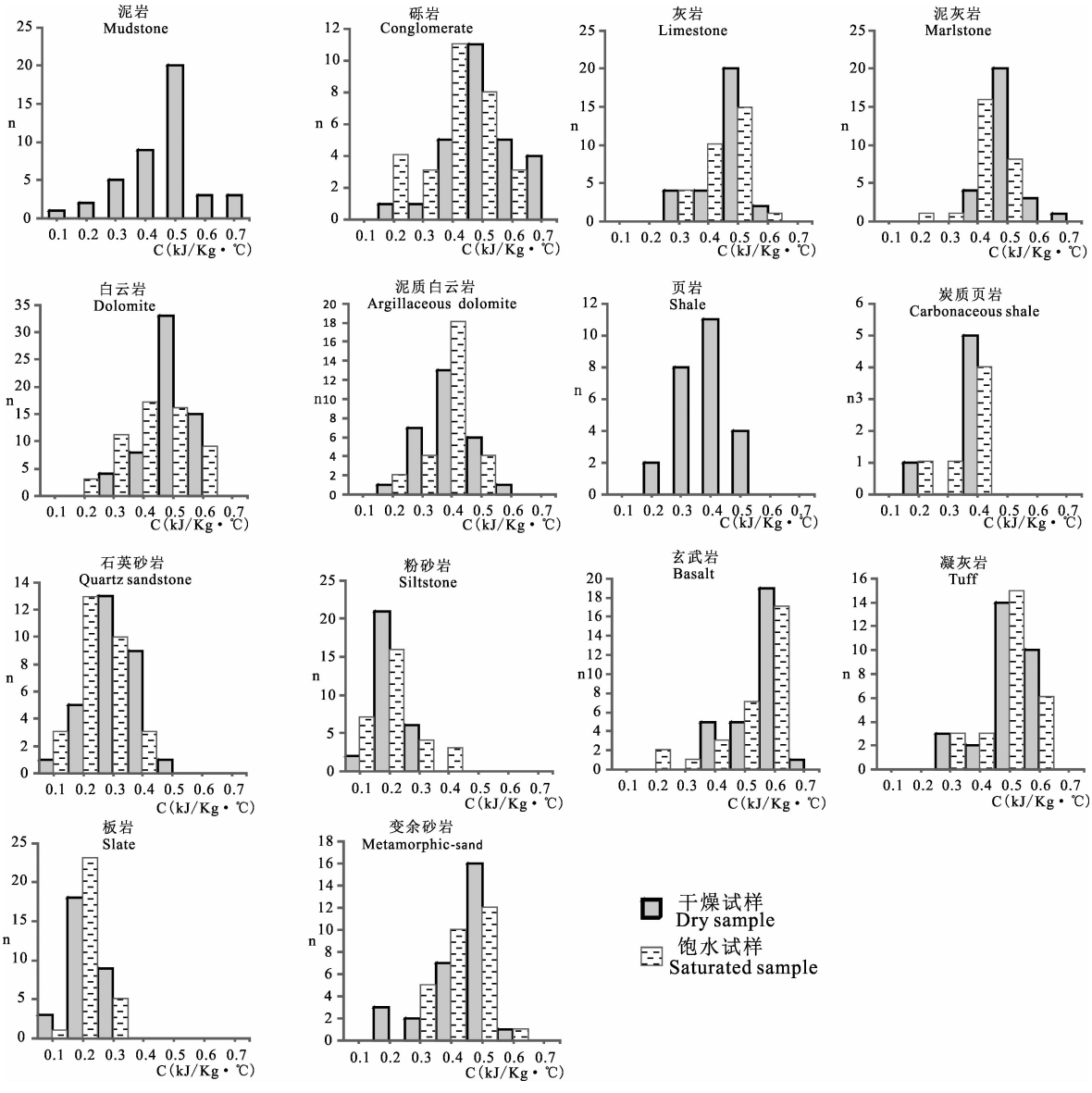

图 3　贵州地区岩石比热分布直方图

Fig. 3　Histogram of thermal conductivities in Guizhou area

0.666W/(m·K)；三叠系中统花溪组白云岩热导率为 3.553±0.621 W/(m·K)，三叠系下统时白云岩热导率为 4.473±0.499 W/(m·K)，到寒武系时白云岩的热导率为 5.066±0.521W/(m·K)。除石英砂岩和白云岩外，区内灰岩、泥灰岩及页岩等均存在岩石年龄越老，热导率越高的现象(图 5)。同热导率的变化基本趋势一致，热扩散系数也随着岩石年龄的增加而增大，这主要是由于较老岩层受上覆地层压实，致使裂隙率或孔隙率较低所致。

4.2　矿物成分

岩石矿物组分不同，其热物性也有所差异，如热导率大的矿物含量高，则岩石的热导率就大(Xu Zhenzhang et al.，1992)。在以“沉积岩王国”著称的贵州，石英、白云石和方解石是构成岩石的主要矿物成分，其中，石英的热导率最大，高达 7.70 W/(m·K)；白云石热导率次之，为 5.44W/(m·K)；方解石的热导率则最低，为 3.60W/(m·K)。从表 1 来看，研究区内白云岩和石英砂岩的热导率明显高于灰岩；白云岩的热导率总体高于石英砂岩的热导率，这可能是受矿物含量、矿物粒度以及孔隙率等因素的影响所致。

对于主要矿物成分相近的岩石，由于矿物组分含量的不同，岩石的热物性也差异较大。如区内岩石中 SiO_2 含量越高，热导率和热扩散系数越大，而比热容越小。从图 6 可以看出，以 SiO_2 为主要矿物成分的变余砂岩、板岩、石英砂岩和粉砂岩，岩石中

表 4 贵州地区岩石热扩散率统计表

Table 4 Rock thermal diffusion statistics table in Guizhou area

地层		岩性	样品数（块）	干燥样 范围（mm^2/s）	干燥样 均值±标准偏差（mm^2/s）	饱水样 范围（mm^2/s）	饱水样 均值±标准偏差（mm^2/s）
白垩系		泥岩	16	0.629～2.418	1.086±0.494	—	—
		砾岩	29	1.170～2.994	1.669±0.380	1.022～4.221	2.121±0.671
侏罗系自流井群		粉砂岩	30	2.046～4.230	2.751±0.481	1.901～5.939	3.506±0.915
		石英砂岩	10	1.560～3.872	2.674±0.591	2.649～4.024	3.600±0.444
三叠系	花溪组	白云岩	15	1.404～2.465	1.753±0.323	1.531～3.794	2.026±0.587
		泥质白云岩	15	0.799～1.533	1.223±0.230	1.377～2.854	1.660±0.355
	安顺组	白云岩	15	1.849～2.494	2.116±0.182	1.995～4.141	2.778±0.714
		泥质白云岩	13	0.999～3.359	2.214±0.547	2.016～4.017	2.973±0.654
	夜郎组	泥岩	15	0.799～1.418	0.963±0.178	—	—
	大冶组	灰岩	15	1.150～2.155	1.434±0.268	1.205～2.034	1.508±0.207
		泥灰岩	10	1.081～1.428	1.248±0.087	1.359～2.379	1.588±0.331
二叠系	长兴组	泥岩	15	0.418～1.468	0.752±0.331	—	—
	峨眉山	玄武岩	30	0.876～1.540	1.024±0.166	0.828～2.092	1.102±0.324
	茅口组	灰岩	15	1.385～2.435	1.623±0.259	1.390～2.693	1.734±0.306
石炭系大唐组		石英砂岩	10	1.142～3.888	2.174±0.699	2.741～4.158	3.468±0.511
		泥灰岩	7	1.153～1.386	1.237±0.089	1.120～3.392	1.658±0.717
		页岩	15	0.443～1.860	0.843±0.383	—	—
泥盆系蟒山组		石英砂岩	10	2.310～3.467	2.854±0.368	2.827～4.298	3.607±0.498
志留系高寨田组		泥灰岩	11	1.096～1.811	1.421±0.207	1.280～1.945	1.594±0.184
寒武系	娄山关群	白云岩	30	1.620～4.044	2.635±0.544	2.464～6.663	3.694±0.996
	明心寺组	页岩	11	0.425～1.498	0.997±0.285	—	—
	牛蹄塘组	炭质页岩	6	0.934～1.465	1.062±0.184	0.854～1.464	1.032±0.202
青白口系		凝灰岩	30	1.232～3.311	1.697±0.401	1.204～3.302	1.841±0.501
		板岩	30	1.119～3.014	1.773±0.496	1.267～3.980	1.914±0.539
		变余砂岩	30	1.165～2.106	1.550±0.252	1.065～3.152	1.772±0.464

SiO_2含量与热导率和热扩散系数存在正相关关系，与比热容存在负相关关系，这与 Jorand et al.(2015)研究的结果一致。

4.3 矿物颗粒粒度

Midttomm 等(1998)在研究人造岩石的热导率时发现，矿物颗粒粒度与岩石热导率之间存在正相关性。在本次采集的 433 件岩石样中，选择了分布地层较多、风化程度低的不同种类岩石进行岩矿鉴定(图 7)，鉴定数量为 26 件，鉴定机构为国土资源部贵阳矿产资源监督检测中心，仪器采用的是 Leiac－DM4500P 偏光显微镜。将岩石中矿物粒度的大小与岩石的热物性参数进行对比分析，发现存在矿物颗粒粒度增大，岩石热导率和热扩散系数也随之增加的现象，而比热容与矿物颗粒粒度的关系则不明显。如寒武系娄山关群白云岩矿物颗粒粒度在 0.03～0.2mm 之间、岩石的热导率为 5.01W/(m·K)、热扩散系数为 2.502mm^2/s，三叠系花溪组白云岩矿物颗粒粒度在 0.01～0.06mm 之间、岩石的热导率为 4.113W/(m·K)、热扩散系数为 1.991mm^2/s；二叠系茅口组灰岩矿物颗粒粒度在 0.2～2.0mm 之间、岩石热导率为 3.22 W/(m·K)、热扩散系数为 1.554mm^2/s，三叠系大冶组灰岩矿物颗粒粒度在 0.01～0.03mm 之间、岩石的热导率为 2.69 W/(m·K)、热扩散系数为 1.281mm^2/s。

4.4 含水量

测试岩石中，除泥岩、页岩由于饱水后松散不能进行测试外，其他岩石均进行了饱水样的热物性测试。由图 3 可以看出，无论是砂岩、白云岩还是灰岩等，不同含水条件下测得的热导率均存在一定的差别，如泥质白云岩干燥条件下的热导率是 3.182±1.213W/(m·K)，在饱水条件下为 3.94±1.119W/(m·K)，饱水条件下比干燥条件下的热导率增加了 23.8%，这与 Cho 等(2009)和 Abid 等(2014)研究得出的干燥状态下岩石的热导率往往小于饱和流体条件下的热导率结论一致。其他岩石饱水条件下比干燥条件下的热导率增加幅度集中在 2%～17%，岩石的饱水程度不同对其热物性质也有影响，这可能水填充孔隙后，形成热流“液桥”，从而降低岩石颗粒间的热阻所致(Li Jishan et al.，2009；

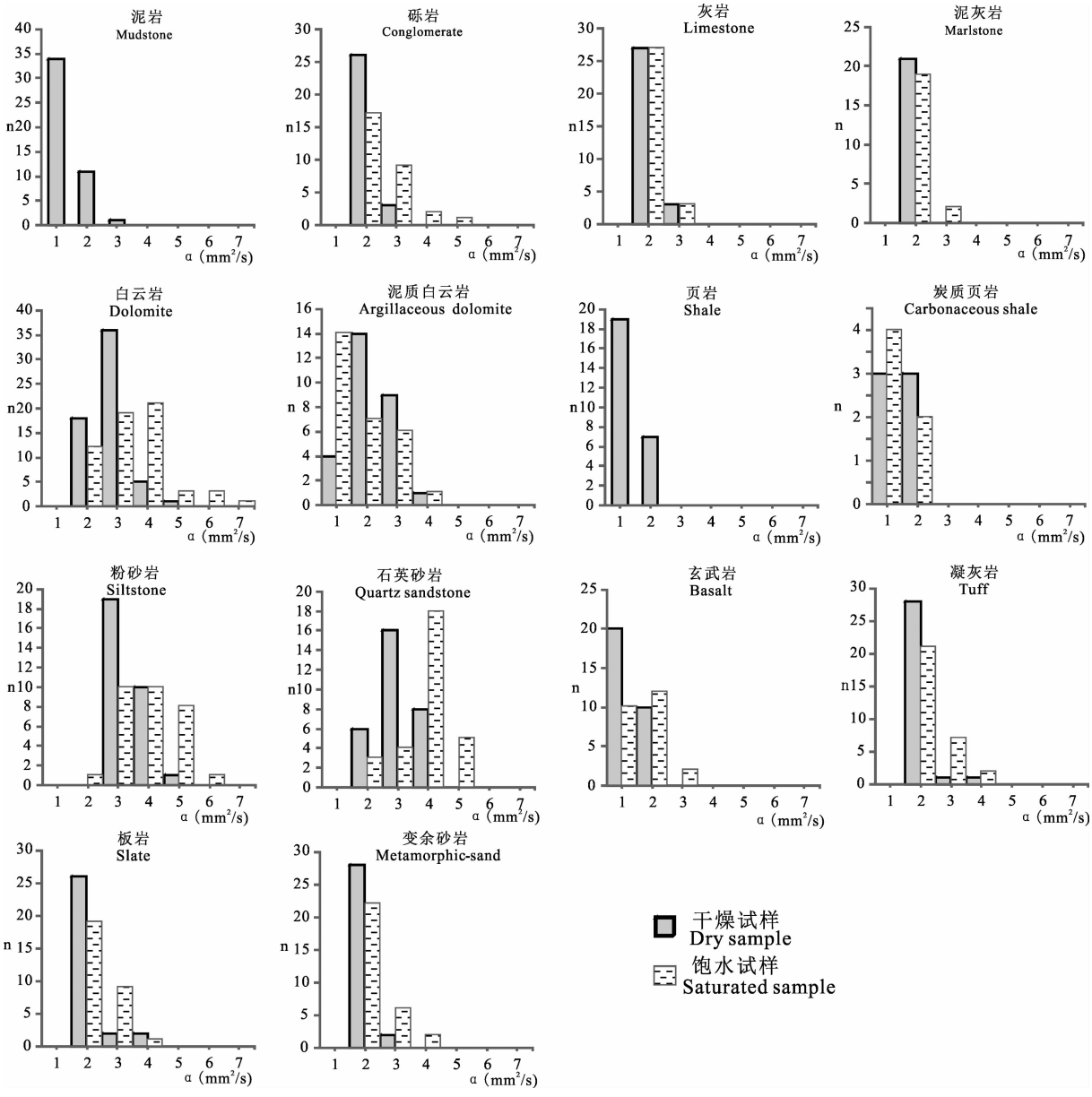

图 4　贵州地区岩石热扩散系数分布直方图

Fig. 4　Histograms of thermal Diffusivity in Guizhou area

Clauser, et al,1995)。研究区干燥岩石和饱水岩石的比热容也存在一定差别,但同热导率相反,饱水条件下比干燥条件下的比热容减少 3.08%～21.79%(图 4)。热扩散系数值与热导率值成正比,与比热容值成反比,因此,热扩散系数与热导率变化规律相似,饱水样较干燥样的热扩散系数均有增加,增加幅度集中在 1%～16%(图 5)。

5　结论

(1)实测数据表明,贵州地区岩石热导率的实测平均值在 1.516 ± 0.264 ～ 5.066 ± 0.521W/(m・K)之间,热导率(干燥)从大到小依次是白云岩、石英砂岩、砾岩、粉砂岩、凝灰岩、泥质白云岩、板岩、变余砂岩、灰岩、泥灰岩、页岩、炭质页岩、玄武岩、泥岩,其中,分布最广的白云岩、灰岩和泥岩的热导率与我国华北地区十分接近,而与西北和东南地区差异较大。区内岩石比热容(干燥)的实测平均值在 0.272 ± 0.042 ～ 0.603 ± 0.096kJ/(kg・℃)之间,比热容平均值从大到小依次是玄武岩、砾岩、白云岩、泥灰岩、凝灰、灰岩、变余砂岩、泥岩、板岩、泥质白云岩、页岩、炭质页岩、石英砂岩、粉砂岩。岩石热扩散系数的实测平均值在 0.752±0.331～2.854±0.368mm²/s 之间,其中,含白云石的碳酸盐和含 SiO_2 的碎屑岩类热扩散系数多在 2.0～3.0mm²/s

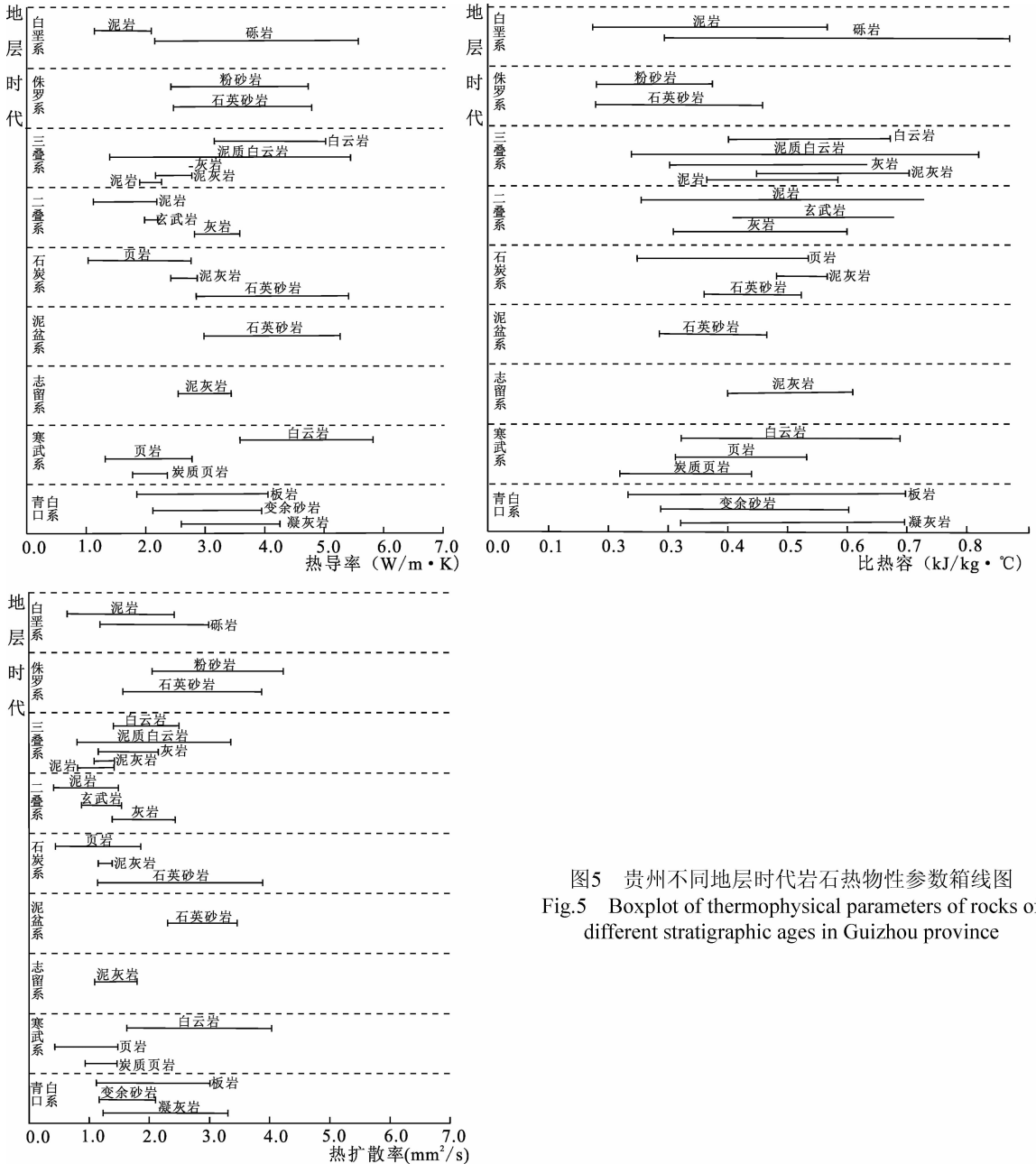

图5 贵州不同地层时代岩石热物性参数箱线图

Fig.5 Boxplot of thermophysical parameters of rocks of different stratigraphic ages in Guizhou province

之间，较其他岩石高；泥岩和页岩的热扩散系数多小于 1.0mm²/s；其他岩石的热扩散系数介于 1.0～2.0mm²/s 之间。

(2)贵州地区岩石热物性与岩石的矿物成分、结构、含水量等因素有关。根据实测数据分析，贵州地区大部分岩石的热导率和热扩散系数与地层年龄存在岩石年龄越老，热导率和热扩散系数越高的关系。区内岩石热物性受矿物组分和含量的影响，热导率大的矿物含量高，则岩石的热导率就大，高热导率矿物含量与岩石的热导率和热扩散系数存在正相关关系，与比热容存在负相关关系。随着岩石中矿物颗粒粒度的增大，区内岩石热导率和热扩散系数也随之增加，而比热容与矿物颗粒粒度的关系则不明显。

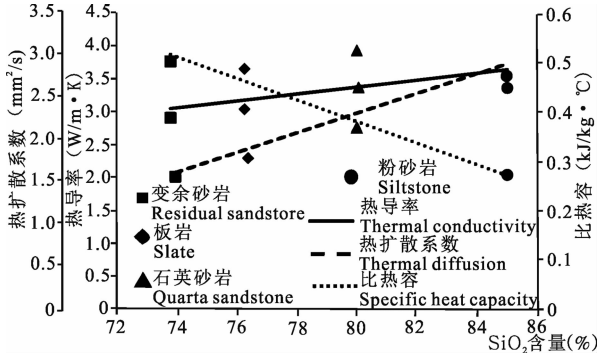

图 6 不同岩性 SiO_2 含量与岩石热物性参数关系图

Fig. 6 Relationship between the content of SiO_2 and the thermophysical parameters of different lithologies

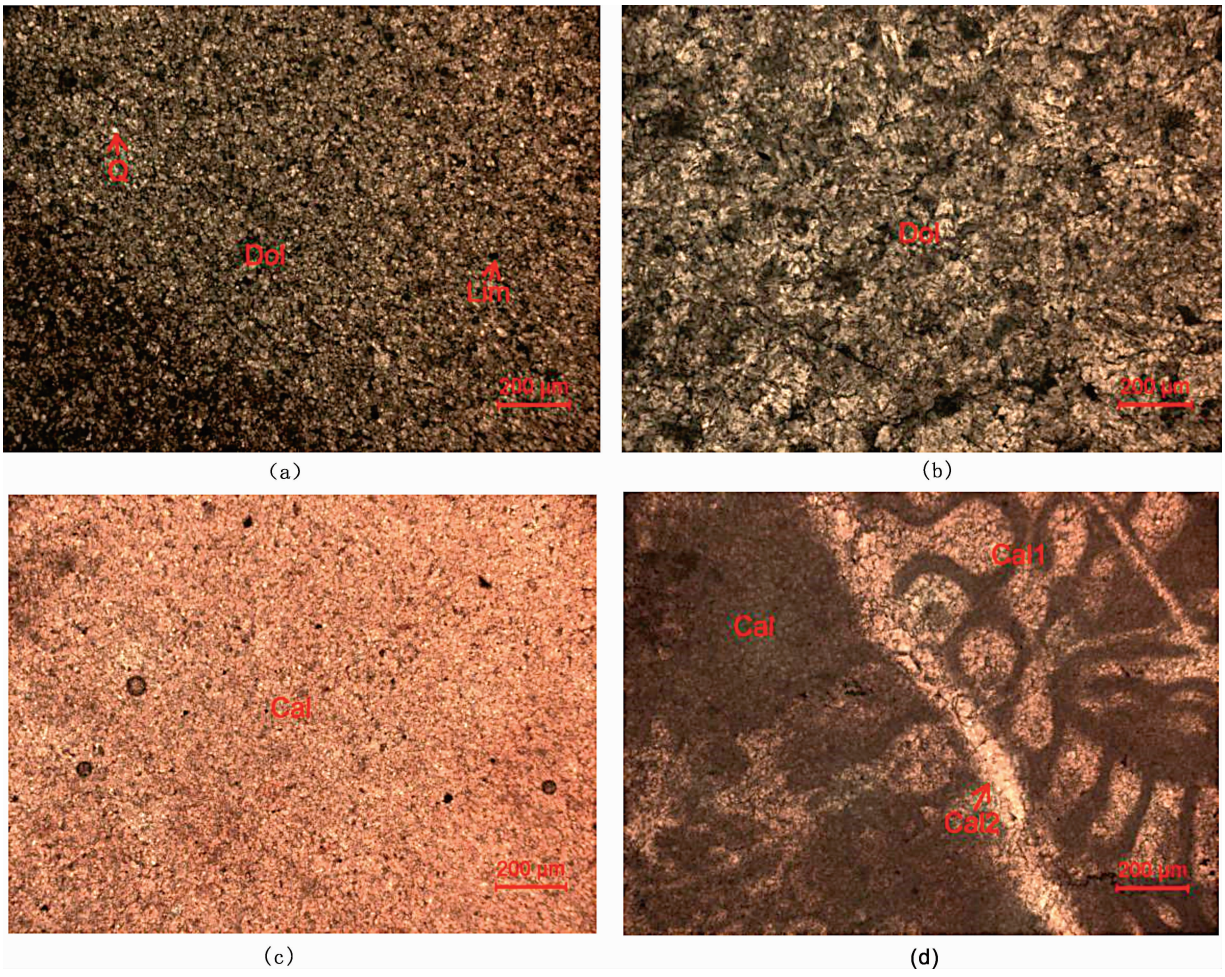

图 7　不同年龄白云岩、灰岩显微镜下照片

Fig. 7　Microscope photos of dolomite and limestone of different stratigraphic ages

(a)—三叠系花溪组白云岩,颗粒粒度 0.01～0.06mm(Dol 为白云石,Q 为石英,Lim 为褐铁矿);(b)—寒武系娄山关群白云岩,颗粒粒度 0.03～0.2mm(Dol 为白云石);(c) 三叠系大冶组灰岩,颗粒粒度 0.01～0.03mm(Cal 为方解石);(d)二叠系茅口组灰岩,颗粒粒度 0.2～2.0mm(Cal 为方解石胶结物,Cal1 为方解石生物碎屑,Cal2 为方解石脉)

(a)—Triassic Huaxi dolostones, particle size 0.01～0.06mm (Dol-dolomite, Q-quartz, Lim-limonite); (b)—Cambrian Luoshanguan dolostones, particle size 0.03～0.2mm (Dol-dolomite); (c) Triassic daye dolostones, particle size 0.01～0.03mm (Cal-calcite); (d) Permian Maokou limestone, particle size 0.2～2.0mm (Cal-calcite cement, Cal1-calcite biodetritus, Cal2-calcite vein)

含水量对区内岩石的热物性影响较大,饱水条件下岩石的热导率比干燥条件下的热导率增加幅度在 2%～17%,热扩散系数增加的幅度集中在 1%～16%,而比热容则减少,减少幅度在 3.08%～21.79%。

References

Abid M, Hammerschmidt U, Kohler J. 2014. Temperature and moisture dependent thermophysical properties of Sander sandstone. International Journal of Thermal Sciences, 86: 88～94.

Beck A E. 1977. Climatically perturbed temperature gradients and their effect on regional and continental heat-flow means. Tectonophysics, 41: 17～39.

Birch A F. 1948. The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients. American Joernal of Science, 53: 413～428.

Chen Moxiang, Huang Geshan, Xiong Liangping, Zhang juming, Wang jun, Yang shuzhen, Shen xianjie, Lu xiuwen, Deng xiao, Peng dajun, Fan zhicheng, Wang jian, Wang jiyang, Shen jiying. 1998. North China geothermal. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).

Chen Zhenming, Wu Xu, Wang Hongwei, Sun dashen. 2016. Research of Thermal Conductive Characteris of Granite under High Temperature. Science Technology and Engineering, 16 (24): 193～197 (in Chinese with English abstract).

Cho W J, Kwon S, Choi J W. 2009. The thermal conductivity for gran-ite with various water contents. Engineering Geology, 107 (3): 167～171.

Clauser C, Huenges E. 1995. Thermal conductivity of rocks and miner-als. // Ahrens, T. J. (ed.) Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants. Washington DC: AGU Publisher, 3: 105～126.

Dai Chuangu, Wang Xuehua, Chen Jianshu, Wang min, Lu dingbiao, Qin shourong, Zhang mingfa, Lin shuji, Jiao

huiliang, Wang liting, Ye nianzeng, Zheng qilin, Liu aimin, Zhu dayou, Liu yingzhong, Qiao wenlang, Xiao jiafei, Ma huizhen. 2017. Regional Geology of China, Guizhou Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Hu Pingfang, Sun Qiming, Yu Zhongyi, Lei fei, Jiang zhangning, Wu lin, Hu lei, Zhan jinling. 2008. Test of Heat Exchang in Ground Heat Exchanger of Ground Source Heat Punp and Thermal Properties of Soil. Gas&Heat, 28(8): 1～4 (in Chinese with English abstract).

Jorand R, Clauser C, Marquart G, Pechnig R. 2015. Statistically reliable petrophysical properties of potential reservoir rocks for geothermal energy use and their relation to lithostratigraphy and rock composition: The NE Rhenish Massif and the Lower Rhine Embayment (Germany). Geothermics, 53: 413～428.

Kwon S, Kim J S, Lee C S, W. J. Cho. 2011. The thermal and mechanicalproperties rock mass around an underground research tunnel ingranite body [C] // 12th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.

Lei Xiaodong, Hu Shengbiao, Li Juan, Yang hequan, Han yuda, Jiang guangzheng, Zheng jia. 2018. Thermal properties analysis of bedrock in Beijing. Progress in Geophysics (in Chinese). 33 (5): 1814～1823 (in Chinese with English abstract).

Li Jishan. 2009. Testing and analysis of thermal properties of reservoir rocks. Journal of Daqing Petroleum Institute, 33(5): 23-26, 117～118 (in Chinese with English abstract).

Li xianglan, Liu shaowen, Xu Ming, Hao chunyan, Wang huayu. 2015. Measurement and analysis of thermal porperties of mudstones and shales in the Lower Yangtze, South China. Natural Gas Geoscience, 26(8): 1525～1533 (in Chinese with English abstract).

Lun Xiwu, Gao Dezhang, Yu Puzhi, Zhao jinhai. 2002. Thermal conductivity of the cenozoic layer of east china sea shelf. Oceanologia et Limnolodia Sinica, 33(5): 151～159 (in Chinese with English abstract).

Lü Chao, Sun Qiang, Deng Shu, Zhang weiqiang, Di jishi. 2017. An experimental study on thermal physical properties of sandstone under high temperature heating. Geology and Exploration, 53 (4): 780～787.

Lü Chao, Sun Qiang, Deng Shu, Di jishi, Wu yun. 2017. Research on the Thermal Conductivity of Sandstone and Limestone after High Temperature Treatment. Geological Journal of China Universities, 23 (4): 626 ～ 623 (in Chinese with English abstract).

Liu Shaowen, Wang Lianshu, Li Cheng, Zhang Peng, Li Hua. 2006. Lithospheric Thermo-Rheological Structure and Cenozoic Thermal Regime in the Tarim Basin, Northwest China. Acta Geologica Sinica, 80 (3): 344 ～ 350 (in Chinese with English abstract).

Midttomme K, Roaldset E. 1998. The effect of grain size on thermal conduc-tivity of quartz sands and silts. Petroleum Geoscience, 4: 165～172.

Norden B, Forster A. 2006. Thermal conductivity and radiogenic heat production of sedimentary and magmatic rock in the Northeast German Basin. AAPG Bulletin, 90(6): 939～962.

Qiu Nansheng. 2002. Haracters of Thermal Conductivity and Radiogenic Heat Production rate in basins of Northwest China. Chinese Journal of Geology, 37(2): 196～206 (in Chinese with English abstract).

Song Ning, Shi Guanghui, Gao Guoqiang, Xin renchen, Fang nianqiao. 2011. Thermal conductivity of Paleogene-Upper Cretaceous rocks in Subei Basin. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 4(1): 10～13 (in Chinese with English abstract).

Vila M, Fernandez M, Jimenez-Munt I. 2010. Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling. Tectonophysics, 490(3): 152～164.

Wang Jiyang, Zhang Jian, Xu Hehua, Hu shengbiao, Huang shaopeng, Shi xiaobin, Yang xiaoqiu, Shi hongcai, Guo xinwei, Liu shaowen, Zhao ping, He lijuan, Sun zhanxue, Pang zhonghe, Wangshejiao, Xu peifang, Wang guangjie, Yang fengtian, Qiu nansheng, Jin chunshuang, Zhang yi, Duan zhongfeng. 2015. Geothermics and its Applications. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).

Wang jun, Wang Jian, Shen Jiying, Qiu nansheng. 1995. Heat Flow in Tarim Basin. Earth Science, 20 (4): 399 ～ 404 (in Chinese with English abstract).

Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi, Liu Zhiming. 2017. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China. Geology in China, 44 (6): 1062～1073 (in Chinese with English abstract).

Xiong Liangping, Hu Shenbiao, Wang Jian. 1994. Analysis on the thermal conductivity of rocks from se china. Acta Perrologica Sinica, 10(3): 323～329 (in Chinese with English abstract).

Xu Zhenzhang. 1992. A discussion of factors influencing thermophysical characteristics of rocks and their mechanisms. Petroleum exploration and development, 19 (6): 85 ～ 89 (in Chinese with English abstract).

Yang Shuzhen, Zhang Wenren, Li Guohua, Shen xianjie. 1993. Experimental Research on the Thermal Conductivity of Water-Saturted Rocks and Correction to the Heat Flow Oeserved in Caidam Basin. Acta Perrologica Sinica, 9 (2): 199 ～ 204 (in Chinese with English abstract).

Yu mingzhi, Fang Zhaohong. 2002. A Method for the On-site Testing of Average Thermo-physical Pa-rameters of Underground Rock Soil. Journal of Engineering for Thermal Energy&Power, 17 (5): 489 ～ 492 (in Chinese with English abstract).

Zhou Yang, Mu Genxu, Zhang Hui, Wang Ke, Liu Jianqiang, Zhang Yage. 2017. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin. Geology in China, 44 (5): 1017～1026 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈墨香，黄歌山，熊亮萍，张菊明，张文仁，王钧，杨淑贞，沈显杰，陆秀文，邓孝，彭大钧，樊志成，汪缉安，汪集旸，沈继英. 1998. 华北地热. 北京：科学出版社.

陈振鸣，武旭，王宏伟，孙大圣. 2016. 高温条件下花岗岩导热特性研究. 科学技术与工程，16(24)：193～197.

戴传固，王雪华，陈建书，王敏，卢定彪，秦守荣，张明发，林树基，焦惠亮，王立亭，叶念曾，郑启钤，刘爱民，朱大友，刘应忠，谯文浪，肖加飞，马会珍. 2017. 中国区域地质志・贵州志. 北京：地质出版社.

胡平放，孙启明，于仲义，雷飞，江章宁，吴林，胡磊，张锦玲. 2008. 地源热泵地埋管换热量与岩土热物性的测试. 煤气与热力，28(8)：1～4.

雷晓东，胡圣标，李娟，杨全合，韩宇达，姜光政，郑佳. 2018. 北京地区基岩地层热物性参数特征. 地球物理学进展，33(5)：1814～1823.

李继山. 2009. 油藏岩石热物理性质测试. 大庆石油学院院报，33 (5)：23～26，117～118.

李香兰，刘绍文，徐明，郝春燕，王华玉. 2015. 华南下扬子区泥页岩热物性测试与分析. 天然气地球科学，26(8)：1525～1533.

栾锡武，高德章，喻普之，赵金海. 2002. 我国东海陆架地区新生代地层的热导率. 海洋与湖泊，33(5)：151～159.

吕超，孙强，邓舒，张卫强，耿济世. 2017. 砂岩热物理性质的温度作用效应试验研究. 地质与勘探，53(4)：780～787.

吕超，孙强，邓舒，耿济世，吴云. 2017. 砂岩和灰岩热导率温度作用效应的实验研究. 高效地质学报，23(4)：626～623.

刘绍文，王良书，李成，张鹏，李华. 2006. 塔里木盆地岩石圈热－流变学结构和新生代热体质. 地质学报，80(3)：344～350.

邱楠生. 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征. 地质科学，37(2)：196～206.

宋宁，史光辉，高国强，辛仁臣，方念乔. 2011. 苏北盆地古近系－上白垩统的岩石热导率. 复杂油气藏，4(1)：10～13.

汪集旸，张健，许鹤华，胡圣标，黄少鹏，施小斌，杨小秋，石红才，郭兴伟，刘绍文，赵平，何丽娟，孙占学，庞忠和，王社教，徐佩芳，

王光杰，杨峰田，邱楠生，金春爽，张毅，段忠丰. 2015. 地热学及其应用. 北京：科学出版社.
王钧，汪缉安，沈继英，邱楠生. 1995. 塔里木盆地的大地热流. 地球科学，20(4)：399～404.
王婉丽，王贵玲，朱喜，刘志明. 2017. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价. 中国地质，44(6)：1062～1073.
熊亮萍，胡圣标，汪缉安. 1994. 中国东南地区岩石热导率值的分析. 岩石学报，10(3)：323～329.
徐振章. 1992. 试论影响岩石热物理性质的因素及机制. 石油勘探与开发，19(6)：85～89.
杨淑贞，张文仁，李国桦，沈显杰. 1993. 柴达木盆地岩石热导率的饱水试验研究及热流校正. 岩石学报，9(2)：199～204.
于明志，方肇洪. 2002. 现场测试地下岩土平均热物性参数方法. 热能动力工程，17(5)：489～492.
周阳，穆根胥，张卉，王克，刘建强，张亚鸽. 2017. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素. 中国地质，44(5)：1017～1026.

Thermal property parameters and influencing factor analysis of main rock strata in Guizhou province

SONG Xiaoqing[1,2)], JIANG Ming[*1,2)], PENG Qin[1,2)], XIONG Peiwen[1)]

1) *Geo-Engineering Investigation Institute of Guizhou Province, Guiyang*, 550008;

2) 111 *Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang*, 550008

* *Corresponding author*: 751379394@qq.com

Abstract

The thermal properties of rocks are indispensable parameters in studying surface temperature, temperature distribution and heat transfer of the Earth. However, there has been no systematic and regional research performed on thermal properties of rocks in Guizhou and even in Southwest China. In order to provide scientific support for research of geothermal, hydrocarbon accumulation and geotechnical engineering in Guizhou and its adjacent areas, this study collected a total of 433 rock samples in this area which are classified into 14 kinds of rocks to test thermal conductivity, specific heat capacity and thermal diffusivity, as well as analyze the thermal properties and influencing factors. The research shows that the measured average value of rock thermal conductivity in the Guizhou area is between 1.516±0.264～5.066±0.521W/(m·K), and the measured average value of specific heat capacity is 0.272±0.042～0.603±0.096kJ/(kg·℃). The measured average value of the thermal diffusivity is between 0.752±0.331～2.854±0.368 MJ/(m^3·K). The thermal properties of rocks in the area are related to mineral composition, structure, water content and other factors. The older the rock age, the higher the thermal conductivity and thermal diffusivity. The thermal conductivity and thermal diffusivity of rock are positively related to high thermal conductivity mineral content, but negatively to heat capacity. With increasing of the particle sizes of the mineral particles in the rocks, the thermal conductivity and thermal diffusivity of the rock increase, while the relationship between the specific heat capacity and the particle size of the mineral is not obvious. Water content imposes highly impact on thermal properties. The thermal conductivity of rock under saturated conditions is 2%～17% higher than that under dry conditions, and the thermal diffusion coefficient is increased by 1%～16%, while the specific heat capacity is reduced, with a reduction range from 3.08% to 21.79%.

Key words: thermal conductivity; specific heat; thermal diffusion; impact factors; rock; Guizhou