

他念他翁山中段第四纪冰川沉积物 时空分布特征与环境

张 威,唐倩玉

(辽宁师范大学城市与环境学院,辽宁 大连 116029)

摘 要:他念他翁山中段位于横断山脉西部,保留着良好的第四纪冰川遗迹,论文以该地区第四纪冰川沉积物为主要研究对象,通过光释光(Object-source lighting, OSL)测年、粒度、磁化率、矿物及化学元素分析等方法,探讨研究区第四纪冰川沉积物在不同时期的沉积学、矿物学、环境磁学以及元素地球化学特征,结合相关环境指标分析该区的环境特点。研究表明:①冰川沉积物总体沉积特征是大小混杂、无层理、无分选、风化程度由倒数第二次冰期到新冰期依次减弱。②研究区冰川沉积物细粒部分在粒度频率曲线上主要呈现双峰或多峰,反映出沉积物的物质来源复杂、形成动力多样。冰碛物的平均粒径在空间上表现出距冰川作用源头越远粒径越小的规律,主要是受冰川作用强度和风化时间长短的影响。③冰川沉积物的磁化率值为 $8.72 \times 10^{-8} \sim 298.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,其中冰水沉积物磁化率的平均值($178.51 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)和波动幅度($17.43 \times 10^{-8} \sim 298.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)要大于冰碛物(平均值 $19.82 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,波动幅度 $8.72 \times 10^{-8} \sim 42.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$),反映出磁铁矿集中分布的粒级与冰水沉积物组成的粒级相似。④地球化学和矿物学指标反映青古隆地区古气候的总体特征为寒冷干燥,其中在末次冰盛期时气候最为干旱,末次冰期中冰阶时气候较为干旱、降水量相对于末次冰盛期有所增加,倒数第二次冰期降水量相对于末次冰盛期和末次冰期中冰阶较多,但气温较低。

关键词:光释光测年;粒度;磁化率;化学元素;矿物学;冰川沉积物;他念他翁山中段

第四纪冰川沉积物是恢复特定时段环境特征的重要替代指标之一,以往对第四纪冰川沉积物的研究主要是进行冰期系列划分,重点关注冰碛物的宏观地貌与微观结构组成,在宏观沉积地貌方面,重点是冰碛物的垄状地形(侧碛垄、终碛垄、中碛垄等)(康建成, 1989; 崔之久等, 1999; 胡恩等, 2010; 陈仁容等, 2012)以及沉积物的风化特征(李亚兵等, 2006),而微观方面则重点研究冰碛物的岩性组成、矿物学特点、元素地球化学组成、粒度分布特征、沉积物颗粒的微结构等方面,在方法上也多基于传统的元素地球化学(王立伦等, 1989; 刘耕年等, 2009)、沉积学(崔之久等, 1994; Evans et al, 2010; 陈安东等, 2016)、矿物学(Jacobson et al, 2002; Krylov et al, 2008)、生物学(唐领余等, 1983; 刘雯雯等, 2015)等分析方法。近年来,随着研究与分析手段的不断进

步,一些新的环境变化指标被引入第四纪研究领域,如对冰川沉积物环境磁学特征的测试与分析(张威等, 2012)、反映化学风化强度的化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA)的运用以及冰川沉积物粘土矿物分析(张子洋等, 2017)等,有力地推动了区域环境分析方面的研究工作。

他念他翁山中段位于横断山脉西部,保留着良好的第四纪冰川遗迹,为恢复西南季风区第四纪冰川演化过程及其环境背景提供了良好的物质基础,然而,该区的第四纪冰川沉积与地貌特征研究比较薄弱。最近几年,在国家自然科学基金项目的支持下,笔者对他念他翁山中段的第四纪冰川地貌进行考察,并对冰期系列进行了初步划分(张威, 柴乐, 2016)。本文即是在前期考察结果的基础上,采用多种环境变化替代指标,对研究区不同时空条件下

收稿日期:2018-10-26;修订日期:2019-01-08。

基金项目:国家自然科学基金项目(41671005)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41671005.]

第一作者简介:张威(1969—),男,吉林松原人,教授,博士,从事环境与灾害地貌研究。E-mail: zhangweilnu@163.com

引用格式:张威,唐倩玉. 2019. 他念他翁山中段第四纪冰川沉积物时空分布特征与环境[J]. 地理科学进展, 38(6): 904-917. [Zhang W, Tang Q Y. 2019. Spatiotemporal characteristics and the environment of Quaternary glacier deposits in the middle Tenasserim Chain. Progress in Geography, 38(6): 904-917.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.06.011

的第四纪冰川沉积物特征进行深入分析,探讨该地区不同时期气候环境的演变特点。

1 研究区概况

他念他翁山中段位于西藏自治区东北部,属于青藏高原东缘山地,是青藏高原和云贵高原的过渡地带,山体大体呈NW-SE走向分布,海拔在3900~5900 m左右(图1),该地区的现代雪线在5400 m左右(张威,柴乐,2016),第四纪冰川遗迹广布,冰川形态类型主要以冰斗冰川、悬冰川为主,共有现代冰川346条(苏珍等,1966),第四纪冰川侵蚀地貌如冰斗、U型谷、冰坎等和堆积地貌如侧碛垄、终碛垄等发育。如图1所示,研究区沿着玉曲流域从东南向西北依次是4号槽谷(简称4号槽,下同)、5号槽谷、6号槽谷、觉曲和如曲谷地,范围在 $96^{\circ}20'E \sim 97^{\circ}60'E$, $30^{\circ}0'N \sim 31^{\circ}0'N$,研究区岩石类型以三叠系的砂岩、粉砂岩、灰岩、板岩,泥盆系的千枚岩、变质岩、板岩,侏罗系的二长花岗岩、紫红色的砂岩、页岩、砾岩为主(陈福忠等,1983)。

该地区属于高原亚温带亚湿润气候,冬季降水稀少、气候寒冷,夏季在西南季风的控制下,降水相对充沛,气候温和湿润,年降水量在500 mm左右,1月份平均气温 $-2.5^{\circ}C$,7月份平均气温 $16.3^{\circ}C$,年平均气温 $7.6^{\circ}C$ (高由禧等,1984)。近40 a冬季气温呈上升趋势,这是年平均气温升高并导致近年来冰川后退的主要原因。

2 材料与方法

2.1 冰碛物分布与采样剖面

研究区共采集20个冰川沉积物样品以及3个光释光(Object-source lighting, OSL)样品。其中:BD-01、BD-02、BD-03、BD-04和OSL-04、OSL-05、OSL-06采自4号槽的二套冰碛物,BD-05采自第三套冰碛物,BD-06、BD-07、BD-08采自6号槽的第四套冰碛物。

RQ-01、RQ-02和RQ-03采自如曲谷地距离冰斗后壁2 km处岩坎处第一套冰碛垄,RQ-04采自距离冰斗5 km的第二套冰碛物,RQ-05采自距冰斗处约11

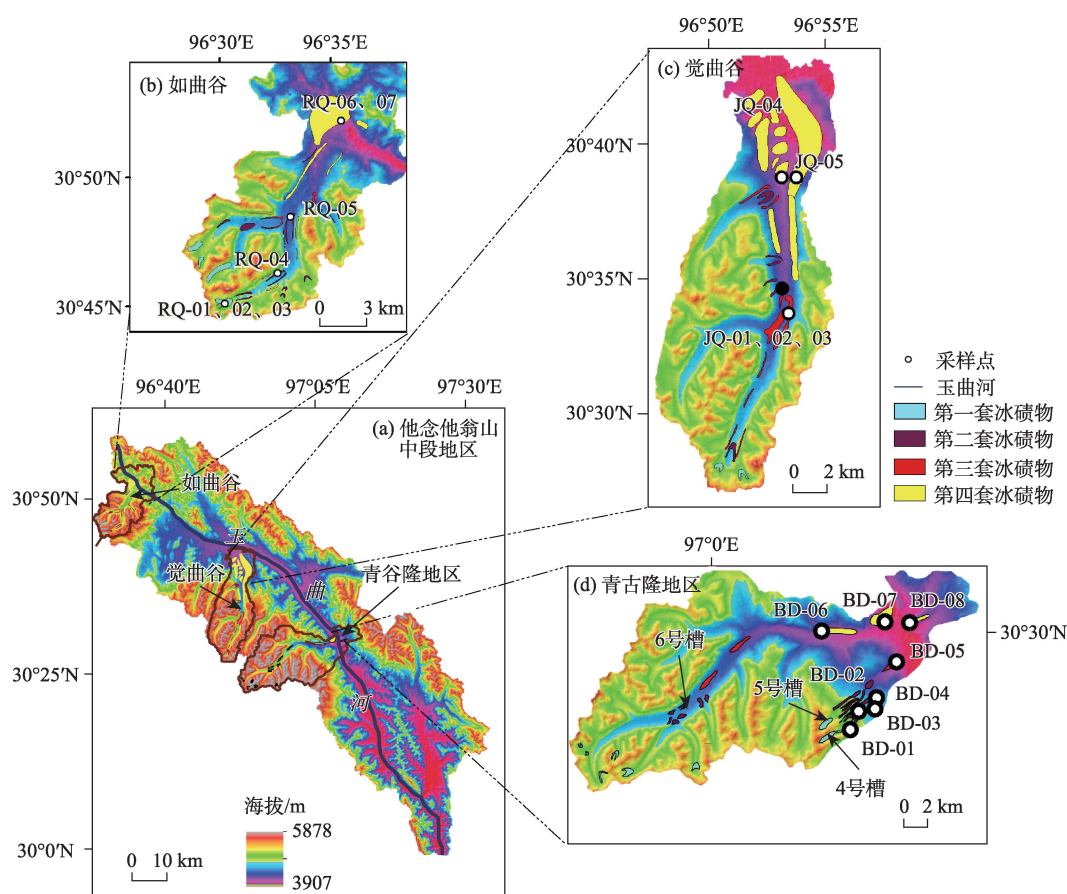


图1 他念他翁山中段地区冰川沉积物采样点分布

Fig.1 Sampling sites of glacier deposits in the middle Tenasserim Chain

km的第三套冰碛物,RQ-06和RQ-07采自距离冰斗源头约25 km的第四套冰碛物末端。

JQ-01、JQ-02和JQ-03采自觉曲谷地第三套冰碛物,JQ-04、JQ-05采自第四套冰碛物。详细的采

样信息见图1、图2和表1。

2.2 实验方法

将样品自然风干和用孔径2 mm的筛子进行筛选后,在华南师范大学光释光实验室对冰川沉积物

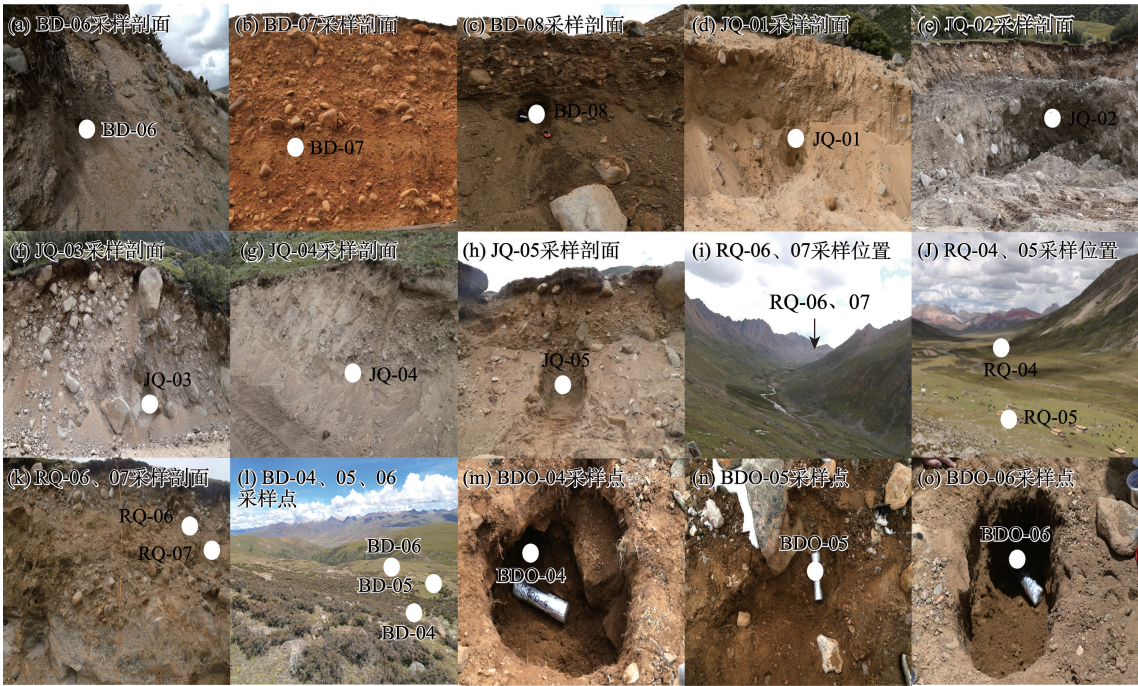


图2 冰川沉积物剖面采样点位置分布示意图

Fig.2 Distribution of the sampling points of the glacier deposits

表1 他念他翁山冰川沉积物样品采样地点及信息

Tab.1 Sampling sites and information of the sampling points of the glacier deposits

样品编号	经度/E	纬度/N	海拔/m	深度/m	沉积物性质
RQ-01	96°30'12.27"	30°45'01.27"	5096	1.0	冰碛物
RQ-02	96°30'19.58"	30°45'03.77"	5081	0.8	冰碛物
RQ-03	96°30'42.23"	30°45'11.66"	5016	0.6	冰碛物
RQ-04	96°32'36.76"	30°46'12.61"	4910	0.5	冰碛物
RQ-05	96°33'10.48"	30°48'17.48"	4770	0.5	冰碛物
RQ-06	96°35'17.63"	30°52'14.01"	4662	1.1	冰碛物
BD-01	97°07'07.72"	30°25'45.91"	5243	0.9	冰碛物
BD-02	97°07'24.75"	30°26'32.76"	5010	1.1	冰碛物
BD-03	97°08'20.17"	30°26'41.32"	4809	1.2	冰碛物
BD-04	97°08'23.16"	30°27'12.43"	4682	0.8	冰碛物
BD-05	97°09'20.53"	30°28'48.01"	4405	1.3	冰碛物
BD-07	97°08'46.41"	30°30'27.79"	4330	1.5	冰碛物
RQ-07	96°36'11.50"	30°51'52.96"	4596	2.1	冰水沉积物
JQ-01	96°53'32.96"	30°34'16.35"	4598	2.5	冰水沉积物
JQ-02	96°53'36.07"	30°34'10.22"	4612	2.0	冰水沉积物
JQ-03	96°53'34.33"	30°34'16.17"	4600	1.6	冰水沉积物
JQ-04	96°53'33.22"	30°38'29.00"	4525	1.7	冰水沉积物
JQ-05	96°53'19.10"	30°38'29.00"	4495	1.2	冰水沉积物
BD-06	97°05'31.02"	30°29'56.94"	4472	1.1	冰水沉积物
BD-08	97°09'58.69"	30°30'26.57"	4380	1.3	冰水沉积物

进行光释光年代分析,在辽宁师范大学沉积学实验室分别进行粒度、化学元素和磁化率分析,在中国地质大学(北京)进行全岩和粘土矿物分析。

光释光测年:① 首先除去粗颗粒,将细颗粒(300 μm)依次浸入稀盐酸和过氧化氢中以除去碳酸盐和有机物。将颗粒再次筛选获得 38~63 μm 的组分,将其浸泡在氟硅酸中以除去长石,然后使用少量稀盐酸以消除样品的氟化物沉淀。通过 IRSL 扫描提取的石英颗粒纯度。② 将硅胶均匀地涂覆在直径为 0.97 cm 的不锈钢晶片上,并将样品均匀地固定在约 0.67 cm 的直径内。通过单片再生剂量(SAR)和标准化生长曲线(SGC)方法测量等效剂量(De),使用热释光/光学刺激的发光读数器。用 90Sr/90Yβ源进行照射。通过中子活化分析(NAA)测量 U、Th 和 K 的浓度以计算年剂量。测试含水量在 0.59%~3.8%之间。③ 根据样本的海拔高度、地理位置和采样深度计算宇宙射线对年剂量的贡献。

粒度分析:① 称取 0.3 g 样品,放在烧杯中;②向烧杯中分别加入浓度为 10%的 H₂O₂和 HCL 溶液,直至完全反应;③ 加入蒸馏水静置后,利用虹吸现象用胶管吸取表面悬浮的液体,重复此步骤,直到用 pH 试纸测试为中性;④ 加入配置好的 5 mL 浓度为 0.05 mol/L 的(NaPO₃)₆溶液,再加 50 mL 蒸馏水,用 LS 13320 激光衍射粒度分析仪震荡 60 s 后测试。

化学元素分析:① 将样品放入研磨器中,使用型号为 SM-1 的振动研磨机研磨,在 30 MPa 的压力下研磨 30 s 以上。② 取研磨好的样品放入 BP-1 粉末压样机中,在 20~30 MPa 的压力下,制成圆饼状样片。③ 将样片放入日本理学公司生产的 X 射线荧光光谱仪中,进行沉积物常量元素测定,分析误差低于 2%。

磁化率分析:① 用电子秤称取容积为 10 cm³的塑料样品空盒的质量为 m_1 ;将样品放入塑料样品空盒中,装满压实后进行称重,质量为 m_2 ;样品质量为

$m=m_2-m_1$;此步骤重复进行 3 次,计算平均值。② 用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪分别对样品的磁化率进行测量,每个样品的低频(0.46 kHz)和高频(4.6 kHz)容积磁化率分别测试 3 次取平均值。③ 样品低频质量磁化率为测量的低频容积磁化率/密度,样品高频质量磁化率为测量的高频容积磁化率/密度,其中密度等于样品的质量/体积,样品频率磁化率为(低频质量磁化率-高频质量磁化率)/低频质量磁化率×100%。

全岩矿物分析:用玛瑙钵将样品研磨后放入载玻片上,取毛玻璃片轻压样品表面,将多余粉末刮掉,反复平整样品,使样品表面压实且不高出载玻片上样品架平面,放入 SmartLab 型 X 射线衍射仪测试,测试后的数据用 Jade 6.0 软件进行分析。

粘土矿物分析:样品过 200 目的筛子后放入烧杯中加 350 mL 蒸馏水,然后用电动搅拌器搅拌 7~8 min,静置 8 h 后,取烧杯中上部浑浊液体至试管(约 11 mL 放入离心机中,离心后的样品放入载玻片上,待自然风干后放入 SmartLab 型 X 射线衍射仪测试,测试后的数据用 Jade 6.0 软件进行分析。

3 结果分析

3.1 OSL 测年结果

等效剂量和年剂量结果列于表 2 中,结合该区域冰川沉积物的 ESR 测年结果(张威,柴乐,2016),得出第四纪期间青古隆地区至少发生了 4 次冰川作用。第一套冰碛物基于相对地貌被确定为来自新冰期/小冰期,对应于 MIS1(MIS=Morine 氧同位素阶段)。第二套冰碛物 OSL-04 (17.3±1.25 ka)、OSL-05 (31.38±3.48 ka)和 OSL-06 (25.78±1.98 ka)的测年结果与 ESR 测年的结果(25±1 ka、38±6 ka、26±4 ka 和 31±6 ka)一致,形成于末次冰盛期(MIS2)。第三套冰碛物上 2 个 ESR 样品年代分别为 55±8 ka 和

表 2 OSL 测年结果
Tab.2 Object-source lighting (OSL) dating result

样品	海拔 /m	采样点	深度 /m	性质	U /(mg·ka ⁻¹)	Th /(mg·ka ⁻¹)	K/%	含水量 /%	年剂量率 /(GY·ka ⁻¹)	等效剂量/GY	年代/ka
OSL-04	4644	97°08'19.99"E 30°27'05.12"N	0.65	细砂、粉砂	2.56	12.0	1.54	0.59	3.428	59.30±4.30	17.30±1.25
OSL-05	4867	97°08'04.04"E 30°26'35.42"N	0.7	细砂、粉砂	2.80	12.9	1.47	0.93	3.476	109.06±12.10	31.38±3.48
OSL-06	4922	97°07'44.36"E 30°26'34.54"N	1.0	细砂、粉砂	2.83	13.0	1.71	3.80	3.645	93.97±7.20	25.78±1.98

54±9 ka,确定第三套冰川沉积物形成于 MIS3b 阶段。第四套冰碛物上 3 个 ESR 样品测年结果为 192 ± 51 ka、207 ± 45 ka 和 207 ± 29 ka,对应倒数第二次冰期(MIS6),是该地区最早的一次冰川作用。

3.2 粒度特征

3.2.1 粒度组成特征

激光粒度仪输出的原始数据经伍登-温哥华方案(Wentworth et al, 1922)分级得出不同粒级的百分比含量,并通过福克和沃德样品统计值图解法的计算公式得出冰川沉积物的平均粒径、标准差、偏度和峰态(表 3)。他念他翁山中段地区冰川沉积物的平均粒径(M_z)为 176.78 μm , 粒级组成以砂级为主(72.72%),其次是粉砂(25.29%)和粘土(1.98%),冰碛物的平均粒径为 145.11 μm ,砂级含量为 67.02%,粉砂为 30.35%,粘土为 2.63%;冰水沉积物的平均粒径为 224.29 μm ,砂级为 81.28%,粉砂为 17.71%,粘土为 1.01%。标准差(σ)能够反映被测沉积物数据的分选程度,当 $\sigma_i > 2$ 时代表分选很差(李全莲等,

2015),研究区冰川沉积物标准差平均值为 2.07,表示分选很差。偏度(S_k)可以用于判断沉积物粒度频率分布的对称性(徐树建等, 2014),研究区冰川沉积物偏度为-0.13~0.51,峰态(K_g)为 0.78~1.25,符合冰川沉积物的特点(Zhao et al, 2010)。

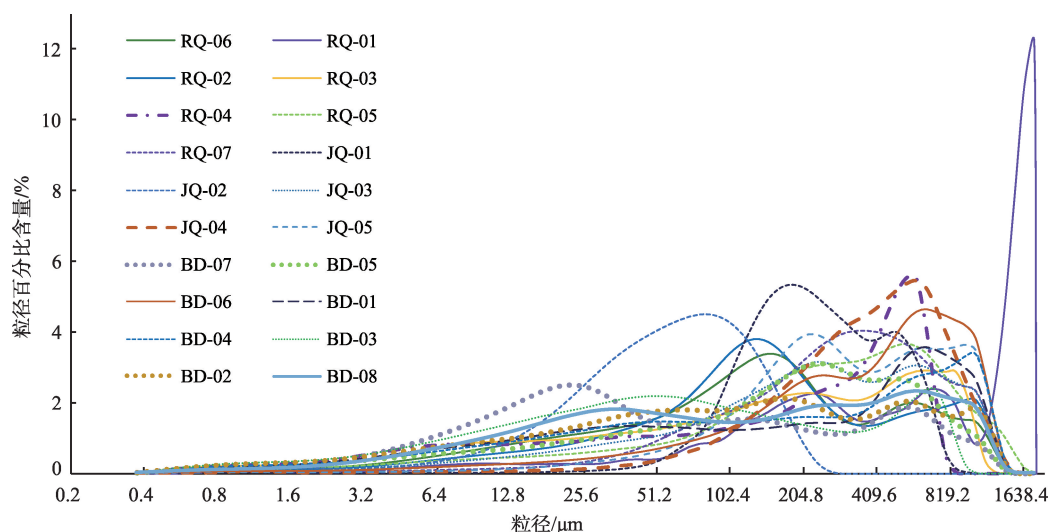
当物质来源复杂或有多种动力形成沉积物时,在频率曲线上会呈现双峰或多峰(刘亮, 2017)。由研究区内冰川沉积物 $\leq 2\text{ mm}$ 粒径频率分布(图 3)可以看出 12 个冰碛物样品中只有 1 个样品(RQ-04)多峰现象不明显,其余样品均为多峰和双峰,能够反映出物质来源复杂,双峰峰值分布在 133~234 μm 和 294~1041 μm ; 8 个冰水沉积物样品中有 2 个样品 JQ-02、JQ-04 呈单峰,其余样品均为多峰和双峰,峰值分布在 176~234 μm 和 493~653 μm 。

3.2.2 粒度变化及其原因

标准差对图解平均值散点图(图 4)对区分不同类型沉积物的差异最有效(Landim et al, 1968),从图 4 可以看出,冰水沉积物相对于冰碛物粒径大而标

表3 研究区冰川沉积物粒度分布及统计参数
Tab.3 Grain size and statistical parameters of the glacier deposits of the study area

样品编号	< 2.0 μm 粘粒/%	2.0~63 μm 粉砂级/%	> 63 μm 砂级/%	平均值(M_z) / μm	标准差 (σ)	偏度 (S_k)	峰态 (K_g)
RQ-01	0.60	8.99	90.41	493.12	2.00	0.44	0.93
RQ-02	1.46	23.92	74.62	137.74	2.10	0.08	1.18
RQ-03	3.28	29.32	67.40	111.11	2.55	0.34	0.86
RQ-04	3.73	28.9	67.37	107.32	2.56	0.51	0.82
RQ-05	1.29	15.84	82.87	213.16	2.00	0.32	1.25
RQ-06	1.65	28.75	69.60	111.11	2.19	0.15	1.03
BD-01	2.83	32.76	64.40	121.58	2.66	0.33	0.78
BD-02	3.78	36.82	59.40	86.57	2.66	0.18	0.92
BD-03	3.28	26.57	70.15	118.26	2.43	0.34	1.07
BD-04	2.98	31.53	65.49	125.87	2.66	0.27	0.81
BD-05	4.13	47.78	48.09	59.54	2.62	0.05	0.96
BD-07	2.58	52.98	44.44	55.94	2.53	-0.13	0.85
冰碛物平均值	2.63	30.35	67.02	145.11	2.41	0.24	0.96
RQ-07	0.50	9.38	90.11	257.03	1.46	0.19	1.08
JQ-01	0.52	2.94	96.54	226.88	0.94	-0.05	0.94
JQ-02	2.43	51.26	46.31	51.12	1.30	0.29	1.16
JQ-03	1.49	18.32	80.19	188.16	2.02	0.31	1.10
JQ-04	0.25	3.24	96.50	360.98	1.11	0.27	0.96
JQ-05	0.40	6.95	92.65	299.37	1.40	0.14	0.93
BD-06	0.81	10.66	88.53	309.93	1.68	0.37	1.10
BD-08	1.66	38.92	59.42	100.83	2.47	0.13	0.81
冰水沉积物平均值	1.01	17.71	81.28	224.29	1.55	0.21	1.01
平均值	1.98	25.29	72.72	176.78	2.07	0.23	0.98

图3 研究区冰川沉积物 ≤ 2 mm 粒径频率分布Fig.3 ≤ 2 mm grain size frequency distribution of the glacier deposits of the study area

准差小,说明冰水沉积物以砂级为主分选性较好。因此,为了避免不同性质沉积物对粒度产生的影响,只对比冰碛物粒度的空间变化,从图5中看出研究区冰碛物离冰川作用源头距离越远粒径越小,一方面是因为被冰川搬运越远,受到磨蚀、压碎越多,导致粒径越小;另一方面是因为距离冰斗近的冰碛

物沉积年龄相对较小,而距离冰斗远的冰碛物沉积年龄相对较大,冰碛物的粒径随着沉积年龄的增大、风化时间的增长而减小。

3.3 磁化率特征

3.3.1 冰川沉积物磁化率

由表4可以看出,该地区冰川沉积物的母岩以花岗岩为主,岩性差别不大,但低频(质量)磁化率相差较大(介于 $8.72 \times 10^{-8} \sim 298.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$),该地区冰川沉积物磁化率的平均值为 $83.30 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,冰碛物质量磁化率的平均值($19.82 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)和变幅($8.72 \times 10^{-8} \sim 42.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)都要小于冰水沉积物(平均值 $178.51 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,变幅 $17.43 \times 10^{-8} \sim 298.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)。

3.3.2 磁化率变化及其原因

沉积物的磁化率及频率磁化率与成壤强度有关。对于研究区内冰碛物的低频磁化率值而言,总体较低($19.82 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)且不同期次差距不大,总体较低是受母岩影响,该地区母岩以花岗岩、砂岩、灰岩为主,其磁化率值较小(表5),不同期次差距不大是由于冰川沉积物以物理风化为,成壤条件弱,不同期次沉积物磁化率差别不明显(刘亮, 2012)。对于研究区内不同类型冰川沉积物的质量磁化率值而言,冰碛物质量磁化率的平均值和变幅均小于冰水沉积物,磁铁矿集中分布的粒级与冰水沉积物组成的粒级相似,所以冰水沉积物的磁化率的变幅比较大(Björck et al, 2010)。对于研究区内冰川沉积物的频率磁化率值而言,质量磁化率值总体较低,导致频率磁化率的误差较大,对气候的指

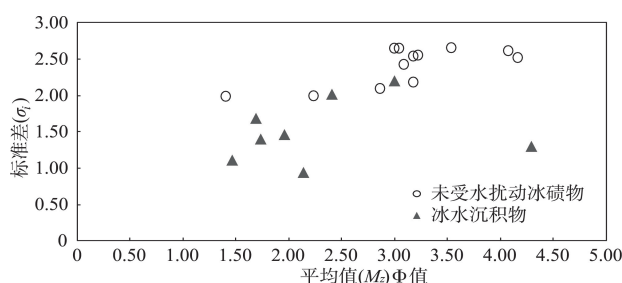


图4 概括图解标准差对图解平均值散点图

Fig.4 Sediment standard deviation versus skew

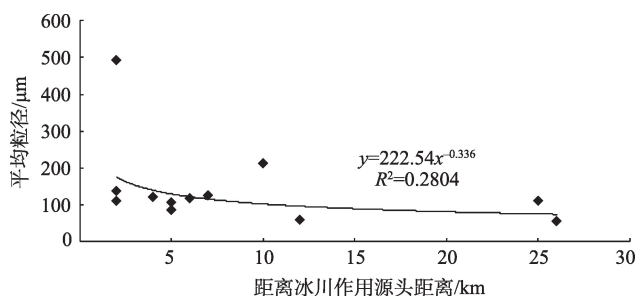


图5 研究区内冰碛物平均粒径与距冰川作用源头距离散点图

Fig.5 Relationship between average grain size of the tills in the study area and distance from the source of the glaciers

表4 研究区冰川沉积物磁化率特征

Tab.4 Magnetic susceptibility of the glacier deposits of the study area

样品编号	低频磁化率 /(10 ⁻⁸ m ³ ·kg ⁻¹)	高频磁化率 /(10 ⁻⁸ m ³ ·kg ⁻¹)	频率磁 化率/%
RQ-01	8.72	8.62	1.15
RQ-02	10.10	10.08	0.20
RQ-03	13.38	12.79	4.41
RQ-04	42.95	42.43	1.21
RQ-05	13.61	14.39	-5.73
RQ-06	17.17	18.05	-5.13
BD-01	12.36	12.24	0.97
BD-02	25.56	25.15	1.60
BD-03	26.22	25.96	0.99
BD-04	20.98	21.63	-3.10
BD-05	15.39	15.03	2.34
BD-07	31.39	31.21	0.57
冰碛物平均值	19.82	19.80	-0.04
RQ-07	17.43	17.38	0.29
JQ-01	210.92	203.89	3.33
JQ-02	248.23	246.66	0.63
JQ-03	298.00	288.01	3.35
JQ-04	273.26	263.55	3.55
JQ-05	93.38	90.94	2.61
BD-06	62.65	62.57	0.13
BD-08	224.23	220.13	1.83
冰水沉积物平均值	178.51	174.14	1.97
平均值	83.30	81.54	0.76

示作用较弱(胡守云等, 2001)。

将研究区与其他地区同一冰期冰川沉积物的质量磁化率进行对比(张威等, 2012), 他念他翁山(末次冰盛期: $21.28 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; 末次冰期: $15.39 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; 倒数第二次冰期: $31.39 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、贺兰山(末次冰盛期: $36.45 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; 末次冰期: $41.66 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、螺髻山(末次冰期: $21.11 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; 倒数第二次冰期: $18.21 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、白马雪山(末次冰盛期: $8.27 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; 倒数第二次冰期: $8.81 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), 发现不同地区同一冰期质量磁化率相差较大, 同一地区不同冰期质量磁化率相差较小。对于同一研究区而言, 磁化率的大小变化不明显主要与冰川沉积物以物理风化为主、成壤条

件弱有关, 对于不同研究区而言, 磁化率相差较大主要与不同地区母岩岩性相差较大有关。

3.4 化学元素特征

3.4.1 化学元素分布特征

表6为该地区冰川沉积物的主要化学元素, 可以看出他念他翁山冰川沉积物中 SiO_2 含量最多, 其次是 Al_2O_3 。他念他翁山地区的冰水沉积物相对于冰碛物, SiO_2 、 CaO 、 K_2O 相对较多, 而 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 含量较少。 SiO_2 在冰水沉积物中要多于冰碛物, 主要是由于冰水沉积物以砂为主, 而砂的成分以石英和长石类矿物为主, 它们包含的化学元素中 SiO_2 含量较多(杜德文等, 2003)。他念他翁山中段冰川沉积物中 SiO_2 含量的平均值为 66.88%, 比玛雅雪山(33.16%)、扎尕那山(54.46%)和马街山(56.01%)高(张威, 崔之久等, 2016), 这也反映出了随着纬度的增高, 降水量和温度降低, 冰川表层的 SiO_2 不易被带走(吴积善等, 1990), 因此向冰川沉积物内部积累的较少。表7给出了他念他翁山中段冰川沉积物主要元素的相关关系, 从表中可以看出 SiO_2 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 与大部分元素呈负相关。 SiO_2 是他念他翁山地区冰川沉积物中最主要的化学元素, 它的多少对其他元素有显著的影响(秦蕴珊, 1987; 王国庆等, 2007)。

3.4.2 化学元素变化及其意义

CIA 值对于研究沉积物的风化程度有重要作用(Nesbitt et al, 1984; 邵菁清等, 2012)。Nesbitt 等(1982)提出了CIA的计算公式:

$$\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100 \quad (1)$$

公式中各氧化物的含量用摩尔数表示, 其中其中 CaO^* 代表硅酸盐中的 CaO , 对碳酸盐和磷灰石含量进行校正, 校正时使用 McLennan(1993)提出的方法, 如果 CaO 含量小于 Na_2O 的含量, 则 CaO^* 采用 CaO 含量; 如果 CaO 含量大于 Na_2O 含量, 则认为 CaO^* 含量相当于 Na_2O 含量(袁方等, 2017)。研究区冰川沉积物CIA值(59.67)很低, 表明了沉积物是在寒冷干燥的气候条件下形成的(冯连君等, 2003), 具有以物理风化为主、化学风化较弱的特点。研究区冰碛物的CIA值(62.39)大于冰水沉积物(55.58), 说明该地区冰碛物的风化程度大于冰水沉积物。

表5 常见岩石类型的磁化率(Dearing, 1994)

Tab.5 Average magnetic susceptibility of common rockes (Dearing, 1994)

岩石类型	花岗岩	白云质灰岩	玄武岩	片麻岩	片岩	板岩	泥岩	页岩	粉砂岩
磁化率值/(10 ⁻⁸ m ³ ·kg ⁻¹)	2.6	1.9	855.6	14.4	9.0	13.6	10.8	3.0	4.5

表6 他念他翁山中段地区冰川沉积物主要元素组成
Tab.6 Major elements of the glacier deposits in the middle Tenasserim Chain

样品编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	CIA
RQ-01	64.72	15.01	2.50	1.27	5.69	0.75	1.85	0.35	0.16	0.07	56.59
RQ-02	66.30	13.99	3.53	1.19	5.28	0.81	1.67	0.41	0.25	0.05	56.83
RQ-03	66.52	14.46	1.89	1.20	5.76	0.71	1.76	0.37	0.25	0.02	56.10
RQ-04	63.24	14.42	3.50	0.66	4.26	0.63	1.05	0.47	0.49	0.07	65.67
RQ-05	65.42	14.92	3.70	0.50	3.96	0.76	0.75	0.51	0.17	0.04	69.88
RQ-06	69.33	12.64	3.34	1.01	3.45	0.90	1.24	0.45	0.18	0.06	62.41
BD-01	66.43	16.09	3.52	0.46	3.41	0.82	2.21	0.48	0.10	0.08	66.34
BD-02	67.20	14.11	2.90	0.51	2.27	0.82	3.16	0.41	0.10	0.05	62.17
BD-03	68.15	14.38	3.06	0.59	2.38	0.97	3.21	0.41	0.06	0.06	61.68
BD-04	71.21	12.83	1.82	0.45	1.97	0.58	3.64	0.29	0.06	0.04	58.93
BD-05	61.97	14.74	5.49	2.24	2.43	1.03	1.55	0.54	0.11	0.10	65.59
BD-07	61.18	16.79	5.20	1.03	4.02	1.20	1.36	0.56	0.17	0.10	66.49
冰碛物平均值	65.97	14.53	3.37	0.93	3.74	0.83	1.95	0.44	0.18	0.06	62.39
RQ-07	65.11	11.60	2.73	4.33	3.73	1.68	1.35	0.30	0.12	0.04	57.76
JQ-01	70.65	13.29	1.54	1.58	5.08	0.25	1.98	0.23	0.13	0.02	53.33
JQ-02	65.90	14.50	2.76	1.83	4.66	0.72	2.02	0.47	0.28	0.06	55.35
JQ-03	68.10	14.02	1.99	1.65	5.96	0.42	1.78	0.33	0.21	0.03	53.24
JQ-04	70.17	13.92	1.03	1.29	5.31	0.22	1.95	0.19	0.11	0.02	55.19
JQ-05	70.69	13.39	1.73	1.33	5.51	0.25	1.79	0.22	0.13	0.02	54.17
BD-06	71.44	12.54	1.97	1.06	4.34	0.67	2.35	0.26	0.08	0.06	54.44
BD-08	63.79	14.75	5.56	1.88	2.48	1.75	2.03	0.57	0.11	0.10	61.16
冰水沉积物平均值	68.23	13.50	2.41	1.87	4.63	0.75	1.91	0.32	0.15	0.04	55.58
平均值	66.88	14.12	2.99	1.30	4.10	0.80	1.94	0.39	0.16	0.05	59.67

表7 研究区冰川沉积物主要元素相关性矩阵
Tab.7 Correlation matrix of major elements of the glacier deposits of the study area

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
SiO ₂	1									
Al ₂ O ₃	-0.627**	1								
Fe ₂ O ₃	-0.808**	0.535*	1							
CaO	-0.222	-0.416	0.060	1						
K ₂ O	0.159	-0.008	-0.510*	0.120	1					
MgO	-0.618**	0.091	0.718**	0.463*	-0.523*	1				
Na ₂ O	0.475*	-0.144	-0.300	-0.314	-0.449*	-0.122	1			
TiO ₂	-0.799**	0.647**	0.912**	-0.137	-0.451*	0.604**	-0.284	1		
P ₂ O ₅	-0.382	0.165	0.075	-0.063	0.411	-0.137	-0.544*	0.256	1	
MnO	-0.703**	0.541*	0.875**	-0.027	-0.514*	0.636**	-0.087	0.797**	0.011	1

注: *、**分别表示在 0.05、0.01 水平(双侧)上显著相关。

在 A-CN-K 图中(图 6a)可以看出,他念他翁山中段冰川沉积物大致分布在上陆壳(UCC)和陆源页岩(PASS)连线上,处于脱 Ca、Na 的化学风化的早期阶段,与青藏高原东缘古冰川沉积物、洛川黄土、周家沟黄土处于同一水平,但部分样品向右偏离风化

趋势线,说明沉积后受到了一定风化作用的影响。在 A-CN-K-FM 三角图中(图 6b),研究区内的冰水沉积物分布在斜长石与黑云母的连线附近,远离 Al₂O₃ 顶点,说明风化程度较低,而冰碛物较冰水沉积物离 Al₂O₃ 顶点更近,说明其风化程度高于冰水

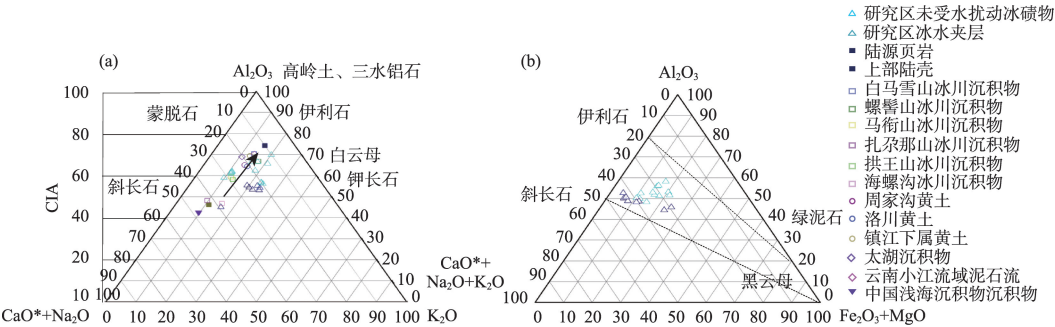


图6 他念他翁山中段冰川沉积物的A-CN-K(a)与A-CN-K-FM(b)三角图

Fig.6 A-CN-K and A-CN-K-FM diagrams with the tills of the glacier deposits in the middle Tenasserim Chain

沉积物,这与与CIA指示的两者风化程度相一致。

3.4.3 化学元素对古气候演变的响应

青古隆地区冰川沉积物的母岩岩性差别不大,以花岗岩为主,岩性对沉积物风化作用的影响较小,其主要影响因素为气候条件和风化时间,因此可以选取地球化学指标来推断不同阶段古气候的特征。为了避免不同性质沉积物对化学元素分析产生的影响,只对比该地区冰碛物地球化学元素指标与古气候演变之间的关系。

表8显示:青古隆地区冰碛物CIA值较低,平均值63.52,范围58.92~66.48,说明风化程度较低,沉积环境寒冷干燥。硅铝系数sa和硅铝铁系数saf能反映沉积物的风化和发育程度,数值越大表明沉积环境越干旱,当saf值>4,表示其具有冰碛物的特征(冯连君等,2003),青古隆地区冰碛物样品sa和saf的变化具有同步性且数值较大,表明沉积环境较干旱,以物理风化为主,化学风化微弱。碱金属淋溶系数T能够表示气候环境,值越小表明环境越温暖湿润。

MIS2阶段(BD-01、BD-02、BD-03、BD-04)CIA

表8 青古隆地区冰碛物地球化学指标

Tab.8 Geochemical parameters of the tills of the Qinggulong area

采样编号	CIA	sa	saf	T
BD-01	66.34	7.01	6.15	0.46
BD-02	62.17	8.09	7.15	0.54
BD-04	58.93	9.42	8.64	0.63
BD-03	61.68	8.05	7.08	0.55
BD-05	65.59	7.14	5.77	0.35
BD-07	66.49	6.19	5.16	0.39

注:sa=SiO₂/Al₂O₃;saf=SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃);T=(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃;式中各参数为分子摩尔比。

值(平均值62.28)为青古隆地区的最小值,说明这一阶段的风化作用较弱,风化时间较短。硅铝系数sa(平均值8.14)和硅铝铁系数saf(平均值7.26)也具有同步性,均为最大值,说明该阶段降水最少,气候最干旱。碱金属淋溶系数T(平均值0.54)为青古隆地区最大值,值越大代表气候越干旱,水热组合条件越不好,说明该阶段降水较少,碱金属淋湿程度低。通过以上指标可以看出,MIS2阶段经历风化程度最低、时间最短,该阶段的气候较为干旱,水热组合条件不好,这与唐领余等(1999)通过钻孔孢粉记录发现他念他翁山中段地区的仁措湖在18 kaBP左右气候寒冷干旱,植被以藜、蒿为主的研究结果相一致。

MIS3b阶段(BD-05)CIA值(65.59)为青古隆地区的中间值,说明这一阶段的风化程度和风化时间大于MIS2阶段而小于MIS6阶段。硅铝系数sa和硅铝铁系数saf相对于MIS2阶段均降低(为7.13和5.76),说明该阶段降水有所增加。碱金属淋溶系数T最小(0.35),水热组合条件相对较好,说明此阶段降水和气温都不是最低的。通过以上指标可以看出,MIS3b阶段经历风化程度和风化时间中等,该阶段的气候较为湿润,降水量较MIS2阶段增加。青古隆地区第三套冰碛物化学综合指标判断古气候的结果与施雅风等(2002)通过研究全球12个地区和23个地点发现MIS3b阶段冰进规模大于MIS2阶段,得出MIS3b冷期的降水比MIS2阶段丰富的结果一致。

MIS6阶段(BD-07),该阶段CIA值(66.49)为青古隆地区的最大值,说明这一阶段的风化程度最大和风化时间最长。硅铝系数sa和硅铝铁系数saf均为最小(分别为6.19和5.16),说明该阶段降水相对于MIS2和MIS3b阶段最多。碱金属淋溶系数T(0.39)大于MIS3b阶段而小于MIS2阶段,说明水热

组合条件居中,和硅铝系数 sa 、硅铝铁系数对比可以推断此阶段降水最多但气温较低。通过以上指标可以看出,MIS6阶段经历风化程度较高和时间最长,该阶段的降水量相对于MIS2阶段和MIS3阶段较多,但气温较低,这与潘保田等(1997)研究青藏高原东北部的冰楔假型发现倒数第二次冰期气温为 $-10\sim-11\text{ }^{\circ}\text{C}$,低于现代当地气温约 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的严寒情况相一致。

3.5 矿物特征与环境

3.5.1 全岩矿物特征

从表9可以看出,冰川沉积物全样矿物的组成以长石(55.30%)、石英(32.55%)为主,其次分别是伊利石(8.45%)和绿泥石(3.20%)。冰碛物主要的矿物成分是长石和石英,属于逆磁性矿物,缺少铁镁含量较多的暗色矿物例如橄榄石、角闪石、辉石等,所以磁化率值较低(王建等, 1996; 张威等, 2012);而冰水沉积物中的绿泥石含量(2.63%)相对于冰碛物的绿泥石含量(3.85%)较低,冰水沉积物较高的磁化率值与绿泥石在风化过程中释放大量的铁、镁离子有关

(Proust et al, 1986)。对于青古隆地区,MIS2阶段,全岩矿物中粘土矿物(伊利石、绿泥石)含量最低(平均值15.25%),这是因为风化时间最短所致;MIS3b阶段,粘土矿物含量最高(平均值17.00%),与此阶段化学指标得出的水热组合条件相对较好结论相一致;MIS6阶段,粘土矿物含量为16.00%,与此阶段化学指标得出的水热组合条件居中相一致。

3.5.2 粘土矿物特征

RQ-01、JQ-01、JQ-02、JQ-04、BD-06在实验过程中因为粘土含量过少而无法进行粘土矿物分析,其余的样品经X射线衍射仪测试分析(表10):冰川沉积物中的粘土矿物以伊利石(平均值77.53%)和绿泥石(平均值20.47%)为主。研究区的岩性条件主要以岩浆岩为主,三叠系和侏罗系的沉积岩仅零星分布,且在采样的几条谷中几乎无出露,因此沉积岩的岩性对粘土矿物的分析结果几乎无影响。沉积物中的粘土矿物会出现伊利石→绿泥石→蛭石→蒙脱石→高岭石的总体演化趋势(Sheldon et al, 2009; Nordt et al, 2010; 方谦等, 2018),伊利石和

表9 他念他翁山中段地区冰川沉积物全岩矿物分析结果
Tab.9 Result of mineral liberation analysis of the glacier deposits in the middle Tenasserim Chain (%)

样品编号	方解石	长石	石英	伊利石	绿泥石	闪石
RQ-01	1.00	66.00	27.00	2.00	3.00	1.00
RQ-02	1.00	64.00	28.00	4.00	3.00	0
RQ-03	1.00	72.00	24.00	1.00	2.00	0
RQ-04	0	47.00	39.00	9.00	5.00	0
RQ-05	0	44.00	41.00	10.00	5.00	0
RQ-06	0	39.00	49.00	10.00	2.00	0
BD-01	0	44.00	28.00	22.00	6.00	0
BD-02	0	43.00	45.00	8.00	4.00	0
BD-03	0	61.00	26.00	10.00	3.00	0
BD-04	0	52.00	40.00	6.00	2.00	0
BD-05	4.00	44.00	35.00	11.00	6.00	0
BD-07	0	55.00	29.00	14.00	2.00	0
冰碛物平均值	0.58	52.58	34.25	8.92	3.58	0.08
RQ-07	0	49.00	41.00	7.00	3.00	0
JQ-01	0	70.00	25.00	3.00	1.00	1.00
JQ-02	0	70.00	24.00	4.00	2.00	0
JQ-03	0	62.00	32.00	4.00	2.00	0
JQ-04	0	64.00	34.00	2.00	0	0
JQ-05	0	66.00	30.00	3.00	1.00	0
BD-06	0	67.00	23.00	7.00	2.00	1.00
BD-08	0	27.00	31.00	32.00	10.00	0
冰水沉积物平均值	0	59.38	30.00	7.75	2.63	0.25
平均值	0.35	55.30	32.55	8.45	3.20	0.15

表10 他念他翁山中段地区冰川沉积物粘土矿物分析结果

Tab.10 Result of clay minerals analysis of the glacier deposits in the middle Tenasserim Chain (%)

样品编号	伊利石	高岭石	绿泥石
RQ-02	57.00	—	43.00
RQ-03	48.00	—	52.00
RQ-04	76.00	—	24.00
RQ-05	65.00	—	35.00
RQ-06	96.00	—	4.00
BD-01	94.00	6.00	—
BD-02	74.00	—	26.00
BD-03	74.00	—	26.00
BD-04	75.00	—	25.00
BD-05	93.00	7.00	—
BD-07	96.00	4.00	—
RQ-07	84.00	—	16.00
JQ-03	55.00	—	45.00
JQ-05	89.00	—	11.00
BD-08	87.00	13.00	—
平均值	77.53	2.00	20.47

绿泥石这2种矿物是沉积物风化的最初阶段,说明沉积物经历的风化过程以物理风化为主,沉积物经历了寒冷干燥的气候环境(Liu et al, 2010; Wang et al, 2013)。从时间上来看,对于青古隆地区,MIS2阶段,粘土矿物中高岭石含量最低(平均值1.50%),是由于风化时间最短所致;MIS3b阶段,高岭石含量最高(平均值7.00%),是由于水热组合条件相对较好所致;MIS6阶段,高岭石含量为4.00%,是因为该阶段水热组合条件一般。从空间上来看,在所有冰川沉积物粘土矿物样品中,只有4号槽和5号槽冰川沉积物样品含有高岭石,这是由于这2条谷相对于其他槽谷,坡度较陡、排水顺畅,利于高岭石的形成(Dixon et al, 1989; Varga et al, 2011; 方谦等, 2018)。

4 结论

依据光释光测年、粒度、磁化率、化学元素以及矿物分析结果,主要结论如下:

(1) 研究区冰碛物的粒径在空间分布上具有明显的特征,冰碛物离冰川源头越远粒径越小,一方面是因为冰碛物被冰川搬运越远,受到磨蚀、压碎越多,所以粒径越小;另一方面是因为随着沉积年龄的增大、风化时间的增长而导致粒径减小。

(2) 通过不同时空冰川沉积物磁化率对比得

出:对于同一研究区而言,磁化率的大小变化不明显,主要与冰川沉积物以物理风化为主,成壤条件弱有关,对于不同研究区而言,磁化率相差较大,主要与不同地区母岩岩性相差较大有关。

(3) 研究区冰川沉积物的全岩矿物组成以石英、长石为主,伊利石、绿泥石次之;粘土矿物以伊利石和绿泥石为主,说明处于沉积物风化的最初阶段,沉积物经历的风化过程以物理风化为主,形成的气候环境寒冷干燥。

(4) 地球化学和矿物学指标反映出青古隆地区古气候的总体特征是寒冷干燥,但在不同阶段古气候具有不同的特点。在末次冰盛期时气候最为干旱,末次冰期中冰阶时气候较为干旱、降水量相对于末次冰盛期有所增加,倒数第二次冰期降水量相对于末次冰盛期和末次冰期中冰阶较多,但气温较低。

参考文献(References)

- 陈安东, 顾佳妮, 赵志中, 等. 2016. 云南大理点苍山末次冰期冰碛物石英砂扫描电镜形态特征分析 [J]. 冰川冻土, 38(2): 453-462. [Chen A D, Gu J N, Zhao Z Z, et al. 2016. Quartz grains SEM surface microtextures of Quaternary glacial sediments along the Diancang Mountain in Yunnan, Southwest China. Journal of Glaciology and Geocryology, 38(2): 453-462.]
- 陈福忠, 廖国兴. 1983. 昌都地区地质基本特征 [M]// 青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社. [Chen F Z, Liao G X. 1983. The basic geological characteristics in Qamdo district//Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Beijing, China: Geological Publishing House.]
- 陈仁容, 周尚哲, 邓应彬. 2012. 末次冰期冰碛垄系列的形态特征及其形成探讨: 以帕隆藏布江谷地为例 [J]. 冰川冻土, 34(4): 836-847. [Chen R R, Zhou S Z, Deng Y B. 2012. Morphological characteristics of glacial deposits during the Last Glaciation: Taking the Parlung Zangbo River basins as an example. Journal of Glaciology and Geocryology, 34(4): 836-847.]
- 崔之久, 杨健夫. 1999. 中国台湾高山第四纪冰川之确证 [J]. 科学通报, 44(20): 2220-2224. [Cui Z J, Yang J F. 1999. Confirmation of the Quaternary Glacier in Taiwan, China. Chinese Science Bulletin, 44(20): 2220-2224.]
- 崔之久, 易朝路. 1994. 天山和阿尔泰山冰碛物显微结构特征 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2(4): 313-319. [Cui Z J, Yi C L. 1994. Microfabric study of till at Mountains Tianshan and Altay. Journal of Basic Science and Engineering, 2(4): 313-319.]

- 杜德文, 石学法, 孟宪伟, 等. 2003. 黄海沉积物地球化学的粒度效应 [J]. 海洋科学进展, 21(1): 78-82. [Du D W, Shi X F, Meng X W, et al. 2003. Geochemical granularity effect of sediment in the Yellow Sea. *Advances in Marine Science*, 21(1): 78-82.]
- 方谦, 洪汉烈, 赵璐璐, 等. 2018. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义 [J]. 地球科学, 43(3): 753-769. [Fang Q, Hong H L, Zhao L L, et al. 2018. Climatic implication of authigenic minerals formed during pedogenic weathering processes. *Earth Science*, 43(3): 753-769.]
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用 [J]. 地学前缘, 10(4): 539-544. [Feng L J, Chu X L, Zhang Q R, et al. 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539-544.]
- 高由禧, 蒋世逵, 张道光, 等. 1984. 西藏气候 [M]. 北京: 科学出版社. [Gao Y X, Jiang S K, Zhang Y G, et al. 1984. *Tibet climate*. Beijing, China: Science Press.]
- 胡恩, 易朝路, 李艳军. 2010. 珠穆朗玛峰绒布河谷冰碛地貌测量与演化研究 [J]. 冰川冻土, 32(2): 316-324. [Hu E, Yi C L, Li Y J. 2010. Observation and evolution investigation of the moraine geomorphology in the Rongbuk Valley of Mount Qomolangma. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(2): 316-324.]
- 胡守云, 邓成龙, Appel E, 等. 2001. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义 [J]. 科学通报, 46(17): 1491-1494. [Hu S Y, Deng C L, Appel E, et al. 2001. Environmental significance of magnetic properties of lake sediments. *Chinese Science Bulletin*, 46(17): 1491-1494.]
- 康建成. 1989. 贡巴冰川边缘冰碛垄特征与形成过程 [J]. 冰川冻土, 11(2): 172-176. [Kang J C. 1989. Grain-size characteristics of glacial debris, and explanation of the processes of glacial transports and sediments at the Gongba Glaciers in Mt. Gongga. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 11(2): 172-176.]
- 李全莲, 张成龙, 武小波, 等. 2015. 中国西部冰川冰尘的粒度及矿物组成 [J]. 山地学报, 33(2): 166-172. [Li Q L, Zhang C L, Wu X B, et al. 2015. Grain size distribution and mineral components of cryoconites of glaciers in Western China. *Mountain Research*, 33(2): 166-172.]
- 李亚兵, 易朝路, 魏灵, 等. 2006. 慕士塔格新冰期以来冰碛物风化成土特征 [J]. 冰川冻土, 28(3): 355-359. [Li Y B, Yi C L, Wei L, et al. 2006. Grain-size features and magnetic susceptibility characteristic of the surfacelayer of the Moraines in the Muztag Ata. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(3): 355-359.]
- 刘耕年, 张跃, 傅海荣, 等. 2009. 贡嘎山海螺沟冰川沉积特征与冰下过程研究 [J]. 冰川冻土, 31(1): 68-74. [Liu G N, Zhang Y, Fu H R, et al. 2009. Sedimentary characteristics and subglacial processes of the glacial deposits in Hailuoguo Glacier, Gongga Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(1): 68-74.]
- 刘亮. 2012. 云南千湖山第四纪冰川作用与环境演变 [D]. 大连: 辽宁师范大学. [Liu L. 2012. *Quaternary glaciations and the environmental evolution in Qianhu Mountain of Yunnan Province*. Dalian, China: Liaoning Normal University.]
- 刘亮. 2017. 阿尔泰山喀纳斯河谷第四纪冰川地貌演化与年代学研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学. [Liu L. 2017. *Quaternary glacial landforms evolution and geochronology in the Kanas River valley, Altai Mountains, China*. Dalian, China: Liaoning Normal University.]
- 刘雯雯, 徐鹏, 朱海峰, 等. 2015. 藏东南地区树轮冰川学研究进展 [J]. 第四纪研究, 35(5): 1238-1244. [Liu WW, Xu P, Zhu H F, et al. 2015. A review on dendroglaciology study in southeast Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 35(5): 1238-1244.]
- 潘保田, 陈发虎. 1997. 青藏高原东北部15万年来的多年冻土演化 [J]. 冰川冻土, 19(2): 124-132. [Pan B T, Chen F H. 1997. Permafrost evolution in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau during the last 150000 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 19(2): 124-132.]
- 秦蕴珊. 1987. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社. [Qin Y S. 1987. *East China Sea geology*. Beijing, China: Science Press.]
- 邵菁清, 杨守业. 2012. 化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候? [J]. 科学通报, 57(11): 933-942. [Shao J Q, Yang S Y. 2012. Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? *Chinese Science Bulletin*, 57(11): 933-942.]
- 施雅夫, 姚檀栋. 2002. 中低纬度 MIS 3b (54~44ka BP) 冷期与冰川前进 [J]. 冰川冻土, 24(1): 1-9. [Shi Y F, Yao S D. 2002. MIS 3b (54-44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(1): 1-9.]
- 苏珍, 蒲健辰. 1966. 横断山冰川发育条件、数量及形态特征 [M]// 李吉均. 横断山冰川. 北京: 科学出版社. [Su Z, Pu J C. 1966. Development conditions, number and morphological characteristics of glaciers in the Hengduan Mountains region // Li J J. *Glaciers in the Hengduan Mountains*. Beijing, China: Science Press.]
- 唐领余, 沈才明, Kam B L, 等. 1999. 南亚古季风的演变: 西藏新的高分辨率古气候记录 [J]. 科学通报, 44(18): 2004-2007. [Tang L Y, Shen C M, Kam B L, et al. 1999. Evolution of the ancient monsoon in South Asia: Tibet's new high-resolution paleoclimatic record. *Chinese Science Bulletin*, 44(18): 2004-2007.]
- 唐领余, 王睿, 孔昭宸. 1983. 西藏东南部若果冰川的孢粉分

- 析[J]. 植物学报, 25(2): 75-82, 111. [Tang L Y, Wang R, Kong Z C. 1983. Pollen analytical investigation of the Ruoguo glacier in southeast Xizang. *Journal of Integrative Plant Biology*, 25(2): 75-82, 111.]
- 王国庆, 石学法, 刘焱光, 等. 2007. 长江口南支沉积物元素地球化学分区与环境指示意义[J]. 海洋科学进展, 25(4): 408-418. [Wang G Q, Shi X F, Liu Y G, et al. 2007. Study on geochemical province of bottom sediment elements from south branch of the Changjiang River estuary. *Advances in Marine Science*, 25(4): 408-418.]
- 王建, 刘泽纯, 姜文英, 等. 1996. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义[J]. 地理学报, 51(2): 155-163. [Wang J, Liu Z C, Jiang W Y, et al. 1996. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implications. *Acta Geographica Sinica*, 51(2): 155-163.]
- 王立伦, 王平, 苏珍, 等. 1989. 横断山冰川地球化学特征[J]. 地理研究, 8(3): 66-77. [Wang L L, Wang P, Su Z, et al. 1989. Geochemical features of the glaciers in Hengduan Mountains. *Geographical Research*, 8(3): 66-77.]
- 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 1990. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社. [Wu J S, Kang Z C, Tian L Q, et al. 1990. Observation and study on debris flow in Ji-angjiagou, Yunnan. Beijing, China: Science Press.]
- 徐树建, 丁新潮, 倪志超. 2014. 山东埠西黄土剖面沉积特征及古气候环境意义[J]. 地理学报, 69(11): 1707-1717. [Xu S J, Ding X C, Ni Z C. 2014. The sedimentary characteristics of Buxi loess profile in Shandong Province and their paleoclimatic and palaeoenvironment significance. *Acta Geographica Sinica*, 69(11): 1707-1717.]
- 袁方, 谢远云, 詹涛, 等. 2017. 地球化学组成揭示的杜蒙沙地化学风化和沉积再循环特征及其对风尘物质贡献的指示[J]. 地理科学, 37(12): 1885-1893. [Yuan F, Xie Y Y, Zhan T, et al. 2017. Source-area weathering and recycled sediment for Dumeng sandy land inferred from geochemistry compositions: Implication for contribution to aeolian dust. *Scientia Geographica Sinica*, 37(12): 1885-1893.]
- 张威, 柴乐. 2016. 他念他翁山中段第四纪冰川作用ESR定年初步研究[J]. 冰川冻土, 38(5): 1281-1291. [Zhang W, Chai L. 2016. The preliminary study of the Quaternary glacier in middle part of the Tenasserim Chain with ESR dating method. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 38(5): 1281-1291.]
- 张威, 崔之久, 李永化. 2016. 青藏高原东缘第四纪冰川发育特征与机制[M]. 大连: 大连海事大学出版社. [Zhang W, Cui Z J, Li Y H. 2016. Characteristics and mechanism of Quaternary glaciers in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Dalian, China: Dalian Maritime University Press.]
- 张威, 李媛媛, 冯骥, 等. 2012. 青藏高原东缘山地古冰川沉积物磁化率特点及其影响因素分析[J]. 地理科学进展, 31(11): 1415-1425. [Zhang W, Li Y Y, Feng J, et al. 2012. Magnetic susceptibility of glacial deposits and the impacting factors in the eastern bordering mountains of the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 31(11): 1415-1425.]
- 张子洋, 闫明, 刘连文, 等. 2017. 北极新奥尔松全新世冰碛物物理化学特征及环境意义[J]. 第四纪研究, 37(2): 293-306. [Zhang Z Y, Yan M, Liu L W, et al. 2017. Physical and chemical characteristics of holocene moraines from NY-Alesund, Arctic and their environment implications. *Quaternary Sciences*, 37(2): 293-306.]
- Björck S, Dearing J A, Jonsson A. 2010. Magnetic susceptibility of Late Weichselian deposits in southeastern Sweden [J]. *Boreas*, 11(1): 99-111.
- Dearing J A. 1994. Environmental magnetic susceptibility using the bartington MS2 system [M]. Kenilworth, UK: Chi Publishing: 52-55.
- Dixon J B, Weed S B, Dinanuer R C. 1989. Minerals in soil environments [J]. *Soil Science*, 150(2): 171.
- Evans D J A, Owen L A, Roberts D. 2010. Stratigraphy and sedimentology of Devensian (Dimlington Stadial) glacial deposits, east Yorkshire, England [J]. *Journal of Quaternary Science*, 10(3): 241-265.
- Krylov A A, Andreeva I A, Vogt C, et al. 2008. A shift in heavy and clay mineral provenance indicates a middle Miocene onset of a perennial sea ice cover in the Arctic Ocean [J]. *Paleoceanography*, 23(1): PA1S06, 1-10.
- Jacobson A D, Blum J D, Walter L M. 2002. Reconciling the elemental and Sr isotope composition of Himalayan weathering fluxes: Insights from the carbonate geochemistry of stream waters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(19): 3417-3429.
- Landim P M, Frakes L A. 1968. Distinction between tills and other diamictons based on textural characteristics [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 38(4): 1213-1223.
- Liu Z, Colin C, Li X, et al. 2010. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport [J]. *Marine Geology*, 277(1): 48-60.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation [J]. *Journal of Geology*, 101(2): 295-303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 299: 715-717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523-1534.
- Nordt L C, Driese S D. 2010. New weathering index improves

- paleorainfall estimates from vertisols [J]. *Geology*, 38(5): 407-410.
- Proust D, Eymery J P, Beaufort D. 1986. Supergene vermiculitization of a magnesian chlorite: Iron and magnesium removal processes [J]. *Clays & Clay Miner*, 34(5): 572-580.
- Sheldon N D, Tabor N J. 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols [J]. *Earth Science Reviews*, 95(1): 1-52.
- Varga A, Újvári G, Raucsik B. 2011. Tectonic versus climatic control on the evolution of a loess-paleosol sequence at Beremend, Hungary: An integrated approach based on paleoecological, clay mineralogical, and geochemical data [J]. *Quaternary International*, 240(1-2): 71-86.
- Wang Q, Yang S. 2013. Clay mineralogy indicates the Holocene monsoon climate in the Changjiang (Yangtze River) Catchment, China [J]. *Applied Clay Science*, 74(3): 28-36.
- Wentworth C K, Chester K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *Journal of Geology*, 30(5): 377-392.
- Zhao X, Zheng B, Qin Y, et al. 2010. Grain size effect on PBDE and PCB concentrations in sediments from the intertidal zone of Bohai Bay, China [J]. *Chemosphere*, 81(8): 1022-1026.

Spatiotemporal characteristics and the environment of Quaternary glacier deposits in the middle Tenasserim Chain

ZHANG Wei, TANG Qianyu

(College of Urban and Environmental Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Vestige of the Quaternary glaciation is well preserved in the middle Tenasserim Chain located in the west of the Hengduan Mountains. In this study, we investigated Quaternary glacial deposits in this area using the methods of luminescence dating, grain size, magnetic susceptibility, and mineral and chemical elements analyses, discussing the characteristics of sedimentology, mineralogy, environmental magnetism, and element geochemistry aspects of Quaternary glacial deposits during different periods in the study area. We also combined the related environmental indicators to analyze the environmental characteristics of this area. The results display that: 1) The overall sedimentary characteristics of glacial sediments are mixed size, no bedding, no sorting, and the degree of weathering weakened from the MIS6 to the MIS1. 2) Fine particles of glacial deposits in the study area show bimodal and multimodal spectra in frequency curves, which reflects that glacial deposits have complex sources. The average grain size of moraines shows that the farther away from the source of glaciation, the smaller the grain size—it was mainly affected by the intensity of glaciation and the duration of weathering. 3) The magnetic susceptibility of glacial deposits in the study area ranges from $8.72 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ to $298.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. The average value ($178.51 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) and amplitude of fluctuation ($17.43 \times 10^{-8} - 298.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) of the magnetic susceptibility of ice water deposits are greater than moraines (average value: $19.82 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, amplitude of fluctuation: $8.72 \times 10^{-8} - 42.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), which reflects that the grain size of centralized distribution of magnetite is similar to the grain size of ice water deposits. 4) The analysis of geochemical indicators of elements and minerals show that the overall characteristics of the paleoclimate in the Qinggulong area was cold and dry; the climate was the driest during the MIS2, but precipitation of the MIS3b was higher. The precipitation of MIS6 was more than the MIS2 and MIS3b, but the temperature was lower.

Keywords: luminescence dating; grain size; magnetic susceptibility; chemical element; mineral; glacier deposits; the middle Tenasserim Chain