

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0104

YANG Shuran, YANG Weilin, HAN Yesong, et al. Reconstruction of glacial extent of the Zheduoshan Mountains, eastern Qinghai-Tibet Plateau and its climatic implications[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1119-1129. [杨舒然, 杨玮琳, 韩业松, 等. 四川康定折多山末次冰盛期古冰川重建及其气候意义[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1119-1129.]

四川康定折多山末次冰盛期古冰川重建 及其气候意义

杨舒然, 杨玮琳, 韩业松, 杨彦敏, 李梦真, 崔之久, 刘耕年

(北京大学 城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要: 折多山位于青藏高原东缘,地势上处于由高原面向高山峡谷的过渡区,古冰川遗迹保留较好。对折多山冰川地貌进行深入研究,对揭示青藏高原东缘地形演化与古气候变化的耦合机制具有重要意义。在野外考察的基础上,结合 Google Earth 遥感影像、《中国第二次冰川编目》和 DEM 等资料,对折多山冰川地貌及其特征参数进行了识别、提取和计算。研究共识别出 189 条古冰川,覆盖面积为 497 km²。基于研究区已有年代学资料,本区冰川地貌主要为末次冰盛期(LGM)以来冰川作用遗存。恢复研究区 LGM 冰川平衡线高度(ELA),在西坡和东坡分别为 4 380 m 和 4 110 m,相差 270 m,揭示出分水岭东侧更有利于冰川发育。广泛发育的冰蚀湖、冰蚀基岩面、羊背石等,以及深切的冰川槽谷(U形谷)指示海洋性冰川作用特征;冰川作用正差、冰川朝向、冰蚀地貌的差异,揭示积累区地形条件和水汽来源对研究区冰川发育具有重要的影响。

关键词: 青藏高原东缘; 折多山; 冰川地貌; 古气候

中图分类号: P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1119-11

0 引言

折多山位于青藏高原东缘的四川西部,属于横断山脉大雪山一脉,整体呈梭形,走向北西-南东,位于大渡河与雅砻江之间。折多山以西是隆起的高原,以东是高山峡谷,折多山最高峰是位于研究区北部的雅拉雪山(5 884 m),康定机场东侧的折多山最高峰 4 962 m(图 1)。折多山在地质构造上属于川滇块体鲜水河断裂带^[1]。气候区划上,该区介于亚热带暖湿季风气候向青藏高原高寒气候区的过渡带,山地东、西两侧的气候差异明显^[2]。

青藏高原东缘的高山区发育有现代冰川,属于海洋型冰川类型,如贡嘎山(7 556 m)、玉龙雪山(5 596 m)^[2-6];第四纪古冰川遗迹十分丰富,前人做了大量有关古冰川地貌特征、冰期系列划分与演化、冰川年代学、沉积学等研究,对古冰川地貌特

征、主要冰期系列有了较为全面的认识^[4,7-10]。前人重点研究的山地包括点苍山^[11-12]、玉龙山^[13-14]、螺髻山^[15-17]、贡嘎山^[18-20]、稻城-海子山^[21-26]、四姑娘山^[27]、雪宝顶^[28]等。这些研究显示青藏高原东缘高山区在第四纪发育出大量山谷冰川,其成因一方面是 MIS 12、MIS 6、MIS 4 和 MIS 2 等阶段的半球性降温事件或者 MIS 3b 等阶段的湿润季风气流带来的充沛降水促进了规模较大的冰川扩张;另一方面就是地貌上构造抬升造成的高海拔提供了有利的低温条件,而高原-山地、山地-盆地等过渡地带的地势差异使得季风容易在此爬升并带来雨水沉降。地势高差造成的水流下切使得部分古冰川地貌在分水岭、台地等地势相对较高的位置能够得以保存,加上冰期与间冰期的多次轮回使得古冰川扩张退缩活动交替频繁,冰川遗迹十分丰富。随着研究成果积累和认识逐步深入,对冰川地貌,如冰川槽

收稿日期: 2020-04-19; 修订日期: 2021-01-03

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0205);国家自然科学基金(41771005)资助

作者简介: 杨舒然,硕士研究生,主要从事冰川地貌研究. E-mail: ysr2830517@yeah.net

通信作者: 刘耕年,教授,主要从事冰川与冰缘地貌研究. E-mail: Liugn@pku.edu.cn

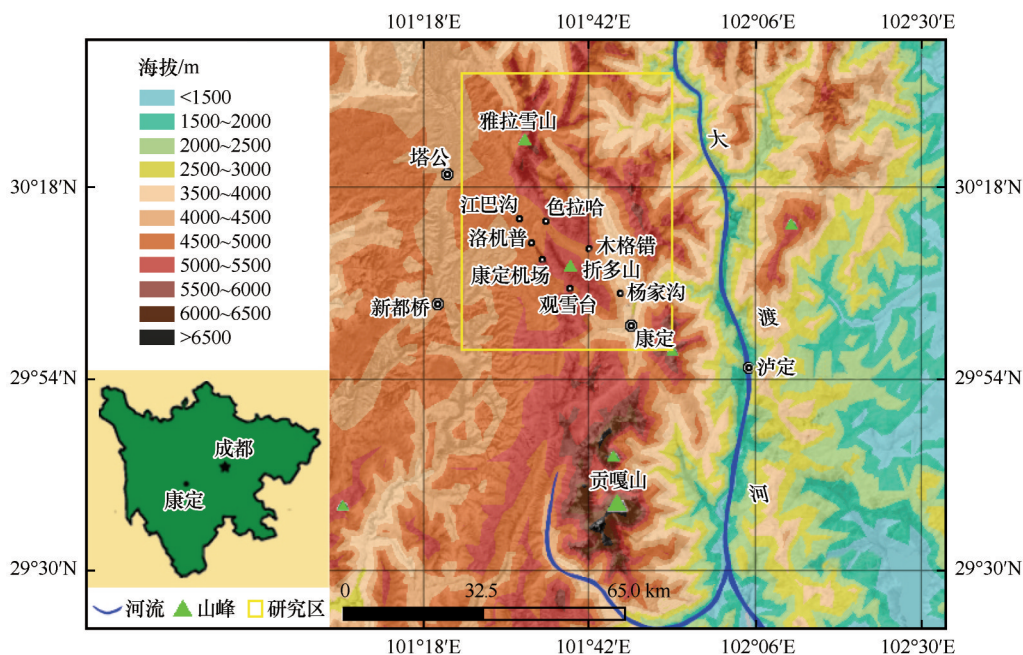


图1 研究区地理位置和地形

Fig. 1 Location and relief map of the study area

谷^[15,22]、冰斗^[16]、冰蚀丘陵^[17]、冰碛垄^[18,20,25]等现象进行精细刻画,年代进行精准确定^[19-20,24-25,28],深刻挖掘其对气候变化过程的指示意义,已是同行的共识^[29-34]。本文基于上述以分析地貌形态为基础进而推测当时气候的认识,拟对川西大雪山一脉的折多山的古冰川地貌进行恢复与重建,提取反映冰川发育的特征值,如冰川作用零平衡线(ELA),分析推测冰川发育的气候环境。研究区范围:29°54'~30°30' N,101°30'~101°54' E(图1)。

1 研究方法

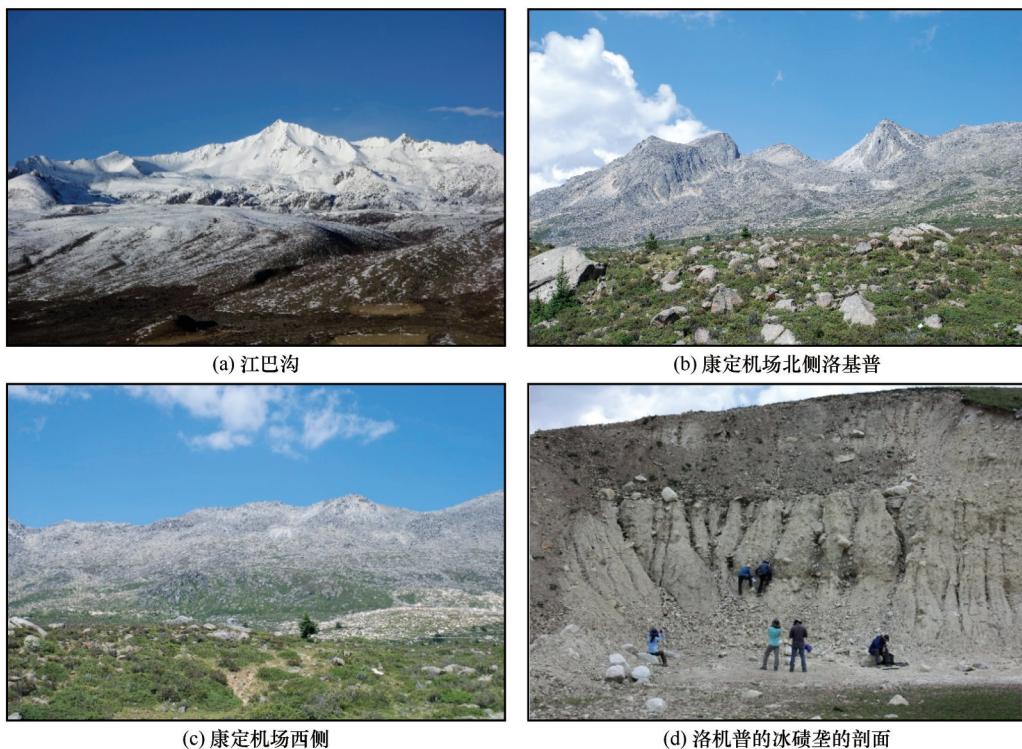
1.1 区域年代序列

Strasky等^[35]和Bai等^[36]采用¹⁰Be暴露年龄法对折多山冰碛垄漂砾测年揭示了新冰期、早全新世、晚冰期和全球末次冰期最盛[global last glacial maximum, gLGM, (21±2) ka^[37]]冰川冰进事件。其中,色拉哈(Selaha)以北江巴沟保存多道较为完好冰碛垄,东侧保留完整的冰碛垄末端海拔3 920 m,¹⁰Be暴露年龄18~22 ka^[36],与gLGM扩张事件同步。折多山东坡的杨家沟,冰碛垄¹⁰Be暴露年龄(18±2) ka^[36],西坡的观雪台、多日阿嘎莫的冰碛垄最大范围均应发生在冰消期之前。因此,根据现有的年代资料,折多山古冰川最大范围(local last glacial maximum, LGM)发生在gLGM时期,与全球性冰川扩张事件同步。

1.2 地貌制图

基于3S(Global positioning systems, GPS, 全球定位系统; Remote sensing, RS, 遥感技术; Geography information systems, GIS, 地理信息系统)技术,本文冰川地貌调查主要采用遥感卫星影像目视解译、野外调查验证和特征值推算相结合的方法。遥感影像资料选用30 m分辨率DEM数字高程数据。首先,根据野外考察记录,确定终碛垄、侧碛垄、冰碛丘陵等典型的冰川堆积地貌以及基岩冰坎、羊背石、冰川擦面等典型的冰蚀地貌(图2)。其中,野外考察地点主要包括康定机场西侧洛机普、南侧318国道观雪台,以及机场北面的江巴沟(图3~图4)。其次,基于Google Earth交互式平台并叠加野外考察记录的特征冰川地貌点以及Strasky等^[35]和Bai等^[36]的gLGM时期本区冰川地貌特征点及年代学成果,根据沉积相似性原理,运用目视解译的方法识别出形态保存较好的冰碛垄^[30-32]。侵蚀地貌重点解译冰斗、槽谷以及冰川湖泊。基于30 m分辨率DEM数字高程数据,使用ArcGIS进行冰川地貌特征值提取,如分水岭、水系、ELA重建、古冰川面积、朝向、坡度等。

然而,由于寒冻风化以及流水侵蚀等后期改造作用,部分冰川作用遗迹保存较差,无法根据遥感影像确定冰川末端以及冰舌边界。因此,在本文中,我们主要依据冰川特征值推算的方法,从统计



注: (a) 江巴沟, 角峰、冰斗、槽谷、冰碛垄; (b) 康定机场北侧洛基普, 终碛垄及终碛垄上的大漂砾; (c) 康定机场西侧, 终碛垄和冰碛丘陵, 没有尖锐的角峰、没有下切的槽谷, 小于 20° 的基岩山坡保留有冰蚀面、羊背石, 以及散落的漂砾; (d) 洛基普的冰碛垄的剖面, 其中有大小不一的角砾石, 棱角清晰分选度差, 排布无规律, 显示典型冰下融出碛特征

(a) Horn peaks, cirques, trough valleys and moraine ridges in Jiangbagou; (b) Terminal moraine ridges of Luojipu, located at the north side of Kangding Airport, dotted with large boulders; (c) On the west side of Kangding Airport, there are terminal moraine ridges and moraine hills, with no sharp horn peaks or cut troughs, and ice erosion surfaces, roche moutonnée and scattered boulders lie on bedrock slopes gentler than 20° ; (d) Glacial deposit profile at Luojipu, in which there are different sizes of angular gravels, poor sorting and irregular arrangement, showing typical characteristics of subglacial melt-out deposits

图2 研究区冰川地貌遗迹(位置见图4)

Fig. 2 Glacial landforms and deposit in the Zheduoshan Mountains (locations see Fig. 4)

学角度计算折多山地区 gLGM 时期冰川能够达到的最低海拔下界^[33]。冰斗末端至后壁比率法(toe-to-headwall altitude ratio, THAR)是基于“ELA 必定位于冰川最高点与最低点之间的某个高度处”这一基本假设,来统计确定冰川 ELA 的一种常用方法^[38]。其中,THAR 值为 ELA 与冰川最低点高程(A_l)之差与冰川最高点(A_h)和最低点高程之差的比值,如公式(1)。

$$\text{THAR} = (\text{ELA} - A_l) / (A_h - A_l) \quad (1)$$

THAR 值常受到冰川规模、类型、表碛覆盖以及雪崩补给等因素的影响^[38]。因此,我们根据现代冰川特征值计算折多山地区的 THAR 值,并假设折多山地区现代和末次冰盛期 THAR 值并未发生变化。然而,由于折多山现代冰川较少,难以统计获得现代冰川的特征值。研究表明,横断山区的冰川受纬度变化的影响小于经度变化的影响,因此,可以认为:折多山毗邻山地的气候环境与折多山基本相

似^[34]。贡嘎山紧邻折多山南侧,且现代冰川广泛发育。因此,我们用贡嘎山的现代冰川特征值,结合发表文章的 ELA,计算出 THAR 值^[38-42]。

从上文可知,本文恢复了冰川遗迹保存较好的 12 条 gLGM 时期的古冰川范围。因此,根据公式(1)的变形形式以及 THAR 值,能够重建折多山地区 gLGM 时期 ELA [见公式(2)]。最后,根据重建的 gLGM 时期 ELA 以及古冰川 A_h ,根据公式(2)计算出 gLGM 时期古冰川最低点高程(A_l)。从而根据等高线分布,确定冰碛垄证据保存较差的 gLGM 时期古冰川下界海拔。

$$\text{ELA} = A_l + \text{THAR} (A_h - A_l) \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 目视解译结果

结合野外考察得到的认识,槽谷最外围的冰碛垄可代表最大古冰川作用的边界。首先,从卫星影

像解译出区内冰碛垄地貌图(图3)。然后依据侧碛垄、终碛垄保存较好的冰川谷有12条,恢复出他们的分布范围。解译的这12条冰川地貌将成为恢复全区冰川分布范围、计算冰川特征值的重要依据。折多山发育众多湖泊,主要类型为冰川湖。冰蚀基岩洼地成因的冰蚀湖最多,其次是冰碛堰塞湖(图3)。据卫星影像解译统计,康定市-康定机场之间的山区共有冰川湖68个,分布在海拔4 180~4 570 m之间,总平均4 390 m;西坡平均4 470 m,东坡4 260 m,相差210 m。整个研究区一共有冰川湖140余个。区内还有几个断层湖,最大的是木格措(图1)。

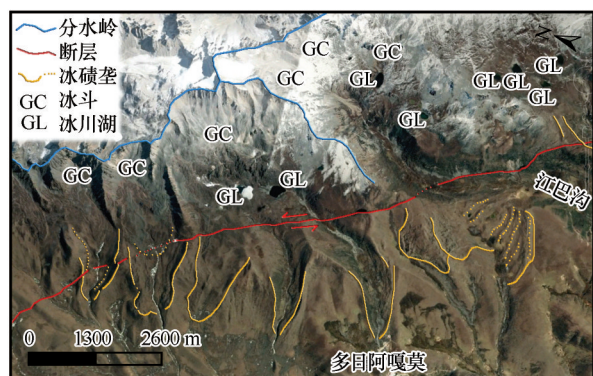


图3 折多山多目阿嘎莫-江巴沟一带代表性冰川地貌
(位置参见图1江巴沟)

Fig. 3 Representative glacial landforms in Duoriagamo and Jiangbagou, Zheduo Shan (cf. Jingbagou of the Fig. 1)

2.2 冰川地貌特征值测算

现代冰川数据来自《中国第二次中国冰川编目》^[43],地形分析提取自从中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)下载的30 m分辨率DEM数字高程数据,地理信息分析使用ArcGIS。

根据前人研究和第二次冰川编目数据,获得贡嘎山现代冰川ELA和THAR值^[8,33,40],按“将今论古”的思路,可将贡嘎山现代冰川的THAR值用于古冰川ELA计算,并用于地理位置毗邻的折多山古冰川重建。根据折多山冰川地貌保存较好的12条沟,恢复出这12条冰川的范围,求出分水岭高度、冰川末端高度,根据之前算出的THAR值重建出这12条冰川的ELA,其平均值代表冰川发育时研究区的ELA。用已知ELA、THAR值,以及从Google Earth提取冰斗后壁高度,推算冰碛垄保存不好的那些冰川的末端海拔高度,以完成这些冰川范围的恢复。

2.2.1 贡嘎山现代冰川ELA和THAR

根据中国第二次冰川编目数据和DEM数据,提取出贡嘎山东、西坡各16条和22条冰川的分水岭高度和末端高度。根据前人研究,贡嘎山现代冰川平衡线高度东坡低于西坡:东坡一般在4 800~5 000 m,西坡在5 000~5 200 m^[44-45],为便于计算,取平均值,即东坡4 900 m,西坡5 100 m。编目资料显示,东坡冰川末端平均海拔4 165 m,海螺沟冰川末端最低,到2 974 m;西坡冰川末端平均海拔4 541 m,大贡巴冰川末端最低,到3 935 m。计算得知贡嘎山THAR值主要分布在0.23~0.54,平均0.40(表1)。

2.2.2 折多山古ELA和古冰川末端高度 A_i 测算

按毗邻山体地理相近性以及“将今论古”的地理学研究原则,假定折多山古冰川的THAR值也是0.40。首先在研究区东、西坡分别找到了六处终碛垄和侧碛垄保存较好的山谷恢复其古冰川范围,获取相关参数。然后按THAR法获得这12条古冰川的ELA(表2),东坡4 110 m、西坡4 380 m,相差270 m。

LGM古冰川末端高度 A_i :为实现全域古冰川恢复,需要对那些地貌标志(冰碛垄)不明显的谷地作古冰川末端高度 A_i 测算。

2.2.3 折多山古冰川数量、面积和地貌类型

研究区全部冰川地貌恢复依据野外考察记录(见3.1节)、卫星影像解译(见3.2节),以及冰川末端高度测算(冰碛垄保存不好的谷地)拟合(见3.3节)。共恢复出189条古冰川,其中西坡97条,东坡92条;总面积497.07 km²,其中西坡193.73 km²,东坡194.58 km²,西坡冰川面积范围0.1~18.4 km²,平均2.0 km²,东坡面积范围0.1~20.5 km²,平均2.1 km²(图4)。冰川最高点高度,西坡4 497~5 278 m,平均4 736 m,东坡4 392~5 785 m,平均4 775 m,东坡比西坡平均值高39 m;冰川末端高度,西坡3 920~4 320 m,平均4 173 m;东坡3 619~3 950 m,平均3 778 m,西坡比东坡平均值高395 m。山岳冰川因地形及形态不同,又可进一步划分为冰斗冰川、悬冰川、山谷冰川等。本文主要根据冰川长宽比(L/W)来划分,并分出四种冰川地貌类型:冰斗冰川,冰川长宽比(L/W)小于1.47,占4%;冰舌冰川,冰川长宽比(L/W)大于1.47且小于3,占43%;山谷冰川,冰川长宽比(L/W)大于3,占23%;还有一种不好进行形态归类的“坡面冰川”^[4],占30%。

关于“坡面冰川”,其积累区没有形成明显冰

表 1 贡嘎山冰川地貌特征值测算统计(平均值)(单位:m)										
Table 1 Typical glacial geomorphological characteristic values in the Mt. Gongga (average value) (unit: m)										
朝向	冰川名称	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	A_h	A_t	ELA	THAR
东坡	燕子沟 G101841E29650N	6 172	6 154	6 033	5 963	5 908	6 046	4 564	4 900	0. 23
	燕子沟 G101848E29664N	6 256	6 192	6 172	5 963	5 945	6 106	4 413	4 900	0. 29
	G101863E29687N	6 256	5 956	5 945	5 721	5 424	5 860	4 146	4 900	0. 44
	燕子沟 G101865E29627N	7 484	6 594	6 144	5 980	5 951	6 431	3 729	4 900	0. 43
	G101866E29741N	6 265	6 066	5 903	5 840	5 474	5 910	4 323	4 900	0. 36
	G101898E29758N	6 499	6 265	6 123	6 077	5 515	6 096	3 482	4 900	0. 54
	G101914E29718N	6 521	6 253	6 077	6 057	5 895	6 161	3 973	4 900	0. 42
	海螺沟 G101916E29584N	7 484	6 620	6 531	6 323	5 951	6 582	2 974	4 900	0. 53
	G101919E29653N	6 871	6 842	6 787	6 733	6 621	6 771	4 144	4 900	0. 29
	G101924E29792N	5 840	5 685	5 608	5 359	5 353	5 569	4 716	4 900	0. 22
	G101927E29546N	6 306	5 873	5 864	5 809	5 798	5 930	4 195	4 900	0. 41
	磨子沟 G1101943E29621N	6 871	6 787	6 621	6 620	6 594	6 699	4 080	4 900	0. 31
	G101948E29533N	5 695	5 603	5 583	5 472	5 328	5 536	3 741	4 900	0. 65
	G101961E29833N	5 366	5 354	5 306	5 297	5 292	5 323	4 786	4 900	0. 21
	G101967E29818N	5 662	5 583	5 556	5 426	5 292	5 504	4 590	4 900	0. 34
	G101975E29793N	5 598	5 556	5 552	5 537	5 516	5 552	4 790	4 900	0. 14
	G101820E29645N	6 033	5 905	5 820	5 794	5 649	5 840	4 594	5 100	0. 41
	G101820E29660N	6 238	6 033	5 887	5 796	5 794	5 950	4 503	5 100	0. 41
西坡	G101824E29728N	6 059	5 798	5 787	5 786	5 582	5 802	4 633	5 100	0. 40
	G101826E29704N	5 952	5 831	5 729	5 654	5 365	5 706	4 548	5 100	0. 48
	G101827E29632N	6 006	5 905	5 889	5 444	5 397	5 728	4 850	5 100	0. 28
	G101828E29739N	5 786	5 682	5 641	5 563	5 497	5 634	4 900	5 100	0. 27
	G101831E29680N	6 364	6 209	6 026	5 992	5 715	6 061	4 466	5 100	0. 40
	小贡巴 G101848E29595N	6 779	6 570	6 402	6 385	6 283	6 484	4 163	5 100	0. 40
	大贡巴 G101855E29563N	6 712	6 599	6 482	6 414	6 115	6 464	3 935	5 100	0. 46
	G101885E29547N	6 258	6 091	5 935	5 876	5 865	6 005	4 503	5 100	0. 40
	G101895E29546N	6 399	6 376	6 349	6 011	5 865	6 200	4 842	5 100	0. 19
	G101908E29542N	6 422	6 221	5 888	5 535	5 473	5 908	4 461	5 100	0. 44
	G101946E29512N	5 948	5 859	5 837	5 759	5 577	5 796	3 948	5 100	0. 62
	G101878E29734N	6 076	6 041	5 898	5 895	5 832	5 948	4 924	5 100	0. 17
	G101895E29718N	6 099	6 056	6 019	5 967	5 859	6 000	4 592	5 100	0. 36
	G101838E29747N	6 059	5 786	5 653	5 497	5 452	5 689	4 615	5 100	0. 45
	G101848E29756N	5 794	5 693	5 630	5 549	5 452	5 624	4 797	5 100	0. 37
	G101852E29776N	6 498	6 283	5 875	5 724	5 669	6 010	4 243	5 100	0. 49
	G101895E29799N	6 438	6 041	5 840	5 739	5 584	5 928	4 403	5 100	0. 46
	G101902E29819N	5 705	5 465	5 395	5 327	5 170	5 412	4 590	5 100	0. 62
	G101928E29829N	5 571	5 510	5 374	5 355	5 321	5 426	4 595	5 100	0. 61
	G101950E29846N	5 374	5 302	5 301	5 277	5 240	5 299	4 786	5 100	0. 61
平均值									0. 40	

注： $h_1 \sim h_5$ 为冰斗后壁根据海拔降低值均匀选取的5个点； A_h 为冰斗后壁平均高度； A_t 为冰川末端高度。

斗,ELA之下也没有形成冰川槽谷,整个冰川在山坡上流动,其侵蚀方式也是以面状冰蚀为主,无侧碛垄发育,终碛垄不规则地分布在坡底[图2(c)]。冰斗冰川、冰舌冰川、山谷冰川等都发育在山谷中,山坡冰川发育在面状山坡上。

3 讨论

3.1 冰川地貌特征

折多山地形切割程度和沟谷延伸方向受地质构造(鲜水河断裂)控制^[1],主山脊线沿 320°~330° NW

表2 折多山古冰川地貌特征值测算统计平均值(单位:m)

Table 2 The geomorphological characteristics mean values of the glacial landforms in Zheduoshan Mountains (unit: m)

位置	冰川后壁高度					A_h	A_t	THAR	ELA
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5				
东坡冰碛垄 保存好的6条古冰川	4 670	4 600	4 560	4 580	4 510	4 580	3 700	0. 40	4 060
西坡冰碛垄 保存好的6条古冰川	4 980	4 900	4 840	4 800	4 780	4 860	4 070	0. 40	4 380
东坡冰碛垄 保存不好的49条古冰川	4 780	4 730	4 700	4 670	4 630	4 700	3 780	0. 40	4 110
西坡冰碛垄 保存不好的55条古冰川	4 740	4 710	4 700	4 680	4 650	4 690	4 170	0. 40	4 380

注： $h_1 \sim h_5$ 为冰斗后壁由高到矮均匀选取的5个点； A_h 为冰斗后壁平均高度； A_t 为冰川末端高度。

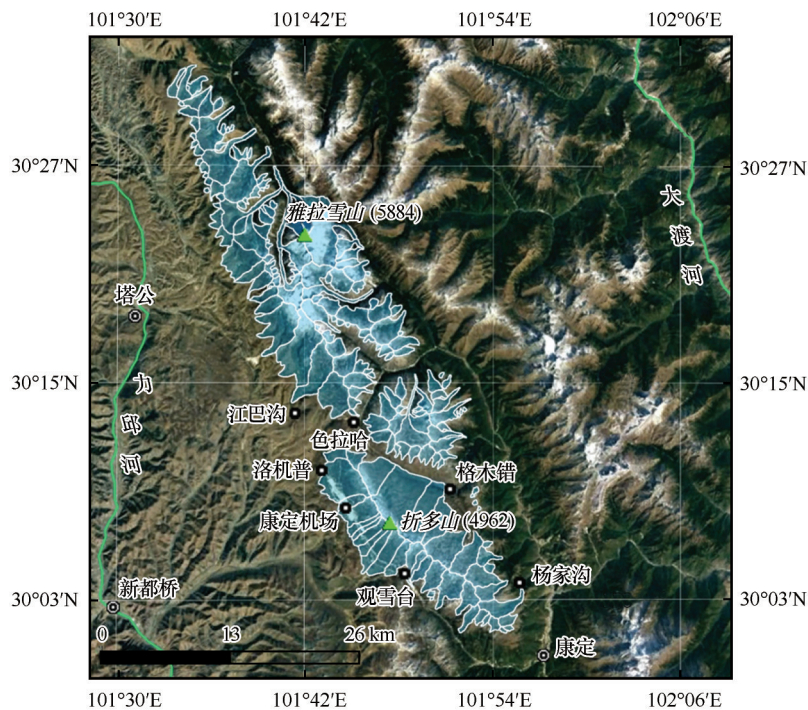


图4 川西高原折多山LGM时的冰川范围(蓝色阴影覆盖区)重建

Fig. 4 The glacial extent in LGM (light blue shadowed zones) of the Zheduoshan Mountains in Western Sichuan Province, SW China

(140°~150° SE)延伸。以主山脊将折多山分为东西坡。东坡以25°以上陡坡为主,沟谷切割深,高差变化大;西坡以5°~15°的斜坡为主,地势较为平缓。东坡的沟谷(冰川谷)多数沿50°~60° NE延伸,西坡为220°~230° SW。受区域构造和气候控制,研究区冰川地貌在分水岭东、西两侧存在差别,主要体现在以下方面:

古冰川平衡线:按THAR=0.4测算,研究区古冰川ELA 平均高度4 250 m,东坡4 110 m,西坡4 380 m,相差270 m。古冰蚀湖:区内共有140余个古冰蚀湖分布在海拔4 180~4 570 m之间,总平均

4 390 m;西坡平均4 470 m,东坡4 260 m,相差210 m。古冰川末端高度:西坡在3 900 m以上,东坡在3 600 m以上,西坡比东坡高约400 m。冰川作用正差:即山峰山脊高出ELA的值,反映积累区垂直幅度,影响冰川类型。在研究区,由于最高峰雅拉雪山(5 884 m)的存在,东坡冰川作用正差比西坡要大得多,最大达1 580 m,众值(峰值)位于500~600 m,占35%,少量不足100 m。西坡冰川作用正差最大1 300 m,中值位于200~300 m,占35%。

冰川地貌类型:冰斗冰川(4%)、冰舌冰川(43%)、山谷冰川(23%)和“坡面冰川”(30%),可见

主要类型是冰舌冰川,冰川规模不大。冰川规模:东坡最长雅拉冰川 12 km,西坡最长江巴沟冰川 9 km。

山峰高度 A_s 、冰川平衡线高度(ELA)、冰川末端高度(A_t)是三个反映冰川规模、决定冰川地貌类型的重要指标。表3为研究区与青藏高原东部边缘几个典型山地冰川的 A_s 、ELA和 A_t 对比。

表3反映出,ELA之上的山体高度,即冰川作用

正差(A_s -ELA)决定冰川规模和地貌类型。末次冰期冰川作用正差大于1 500 m,形成大型山谷冰川,例如贡嘎山;冰川作用正差在1 000~1 500 m,形成中型山谷冰川,例如玉龙雪山、雪宝顶;冰川作用正差在1 000~500 m,形成小型山谷冰川和冰舌冰川,例如小相岭、螺髻山;冰川作用正差在500 m以下的,形成冰舌冰川和冰斗冰川,例如点苍山、拱王山、九顶山。

表3 青藏高原东部边缘山地冰川地貌特征值对比^[2-5,13,15-18,20-23,26-27,44-48](单位:m)

Table 3 Comparison of geomorphological characteristics of glacial landforms in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau^[2-5,13,15-18,20-23,26-27,44-48](unit: m)

名称	A_s	ELA		Δ ELA	A_s -ELA		A_t		ELA- A_t	文献来源
		现代	LGM		现代	LGM	现代	LGM		
点苍山	4 122	—	3 800	—	—	300	—	3 600	200	Yang 等, 2007 ^[12]
拱王山	4 344	—	3 700	—	—	600	—	2 900	800	况明生等, 1997 ^[46]
玉龙山	5 590	4 800~5 000	4 100	700~900	490	1 490	4 400 4 500	2 800	1 300	赵希涛等, 2007 ^[13]
螺髻山	4 359	东坡	3 860	—	—	500	—	2 500	1 360	崔之久等, 1986 ^[15]
		西坡						3 250	610	
小相岭	4 791		3 900	—	—	890	—	2 600	1 300	易朝路, 1989 ^[47]
贡嘎山	7 556	东坡 4 800~5 000	4 000	东坡 800	2 750	3 550	3 000	1 850	2 150	王杰等, 2012 ^[20]
		西坡 5 000~5 200	4 600	西坡 400	2 550	2 950	3 900	3 300	1 300	
折多山	5 884	5 000	4 110	东坡 890	580	1 770	4 700	3 600	510	本文
			4 380	西坡 620		1 500	5 000	3 900	480	
四姑娘	6 250	东坡 4 800	4 000	800	1 450	2 250	4 100	3 000	1 000	刘淑珍, 1986 ^[27]
九顶山	4 984	—	4 100	—	—	880	—	3 720	380	周尚哲等, 2017 ^[48]
雪宝顶	5 588	5 000	4 000	1000	580	1 580	4 760	3 300	700	Liu 等, 2018 ^[28]

3.2 古冰川地貌的气候指示意义

青藏高原东南部的降水由来自印度洋(孟加拉湾)、西太平洋(南中国海)及西风环流的水汽提供,气候上属于东亚季风区^[50]。已有气象观测和模拟试验揭示,高原周边存在异常降水中心,其非均匀水汽输送分布与高原小尺度“山谷群”地形效应存在显著相关;这种特殊的大气-地形耦合作用使气流受地形动力强迫抬升作用和局地动力扰动,形成“迎风坡”和“喇叭口”效应,例如雅安“天漏”^[51-53]。这种大气-地形耦合效应对青藏高原周边冰川发育

提供了有利条件。就研究区而言,西太平洋暖湿季风在向西移动到高原东侧时因地形抬升导致温度降低形成降水,为山区尤其迎风坡方向的冰川发育带来充分水量。

对比青藏高原东部点苍山、拱王山、螺髻山、小相岭、贡嘎山、折多山、四姑娘山、九顶山、雪宝顶等(表4),其第四纪冰川地貌,其冰川地貌规模和类型的差异性都与地形-降水效应相关^[4,35]。这种冰川发育的地形效应在青藏高原及周边山地是普遍存在的,例如,喜马拉雅山脉珠峰南坡的孔布冰川

表4 贡嘎山和玉龙雪山冰川末端和平衡线位置温度降水^[4,51-54]

Table 4 Temperature and precipitation at glacier terminal and ELA in Mt. Gongga and Mt. Yulong^[4,51-54]

山名	坡向	冰川名称	冰川末端			ELA			文献来源
			海拔/m	温度/℃	降水/mm	海拔/m	温度/℃	降水/mm	
贡嘎山	东坡	海螺沟	3 000	3.9	1 940	4 900	-4.4	3 000	苏珍等 ^[44-45] (1993, 2002)
	西坡	大贡巴	3 700	2.2	1 140	5 100	-6.0	1 800	李吉均等 ^[4] (1996)
玉龙雪山	东坡	白水1号	4 400	-1.0	1 600	4 800	-2.0	1 800	辛惠娟等 ^[54] (2012)

(Khumbu Glacier), 天山山脉托木尔峰(Jengish Chokusu, 7 433 m)–汗腾格里峰(Khan Tengri)西坡的南伊内里切克冰川(South Inylchek Glacier), 喀喇昆仑山脉塔吉克境内的费琴科冰川(Fedchenko Glacier)、乔格里峰(K2)两侧的锡亚琴冰川(Siachen Glacier)和比阿佛冰川(Biafo Glacier)等等。

冰川发育区遗留着遭受强烈冰蚀的基岩地面, 如康定机场东侧“坡面冰川”范围遗留的大片冰蚀面和羊背石等。140余个冰蚀湖分布在海拔4 200 m以上, 构成高原周边冰蚀湖密度最大发生地, 揭示折多山古冰川发育时存在较强的底部滑动、磨蚀, 反映冰川收入多, 支出也多, 活动性强, 侵蚀地形发育, 雨水充沛, 气温也较高, 属于海洋性冰川气候类型, 或者温冰川^[50, 54]。

4 结论

通过野外考察、遥感影像数据、《中国第二次冰川编目》数据, 应用ArcGIS工具, 对折多山冰川地貌及其特征参数进行了识别、提取和计算。基于研究区已有年代学资料, 本区冰川地貌主要为末次冰盛期(LGM)以来冰川作用遗存。

研究区共识别出189条古冰川, 面积497 km², 主要地貌类型有冰斗冰川、冰舌冰川和山谷冰川。研究区冰川最大范围时, ELA西坡为4 380 m、东坡为4 110 m, 相差270 m, 揭示出分水岭东侧的冰川发育具有较有利的水热条件, 来自东南方向的水汽沿着大河谷溯源上到东坡高山段形成较多降水; 气流翻过分水岭到西坡已失掉大量水分, 降水相对少, 不利于冰川发育。冰川末端高度东坡低西坡高同样揭示上述水热气候特征。冰川发育区遗留着遭受强烈冰蚀的基岩地面, 以及众多的冰蚀湖、羊背石、深切的冰川槽谷(U形谷)等揭示其海洋性冰川属性。

青藏高原及其周边山地大规模冰川发育中心, 高峻的山脉普遍存在较大的冰川作用正差、山谷朝向水汽来向、围椅状积累区地形, 成为发育大型冰川的有利条件。折多冰川地貌揭示积累区地形条件和水汽来源对研究区冰川发育具有重要的影响。

参考文献(References):

- [1] Wang Hui, Liu Jie, Shen Xuhui, et al. Influence of fault geometry and fault interaction on strain partitioning within western Sichuan and its adjacent region[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(7): 1056-1070.
- [2] Li Zongxing, He Yuanqing, Wang Shijin, et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains region during 1900—2007[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1319-1330. [李宗省, 何元庆, 王世金, 等. 1900—2007年横断山区部分海洋型冰川变化[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1319-1330.]
- [3] Cui Zhijiu. A preliminary observation of modern glaciers in the Mt. Gongga, Hengduan Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 1958(3): 318-342. [崔之久. 贡嘎山现代冰川的初步观察[J]. 地理学报, 1958, 25(3): 318-342.]
- [4] Li Jijun, Su Zhen. Glaciers in Hengduan Mountains[M]. Beijing: Science Press, 1996. [李吉均, 苏珍. 横断山冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [5] Liu Qiao, Zhang Yong. Studies on the dynamics of monsoonal temperate glaciers in Mt. Gongga: a review[J]. Mountain Research, 2017, 35(5): 717-726. [刘巧, 张勇. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史、现状与展望[J]. 山地学报, 2017, 35(5): 717-726.]
- [6] He Ze, He Yuanqing, Zhang Zhigang, et al. OSL dating of the Quaternary glacial sedimentary sequences at Mt. Yulong, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1544-1552. [何则, 何元庆, 张志刚, 等. 玉龙雪山冰川沉积序列OSL定年[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1544-1552.]
- [7] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen, et al. The quaternary glaciations and environmental variations in China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2006: 407-441. [施雅风, 崔之久, 苏珍, 等. 中国第四纪冰川与环境变化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006: 407-441.]
- [8] Cui Hang, Cao Guangchao, Chen Kelong, et al. A review on the reconstruction of palaeoclimate by glacial landform in the Tibetan Plateau and adjacent mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 254-262. [崔航, 曹广超, 陈克龙, 等. 青藏高原及毗邻山地利用冰川地貌重建古气候的研究综述[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 254-262.]
- [9] Liu Beibei, Zhang Wei, Cui Zhijiu, et al. Climate-tectonics coupling effect on Late Quaternary Glaciation in the Mayaxue Shan, Gansu Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 701-710. [刘蓓蓓, 张威, 崔之久, 等. 青藏高原东北缘玛雅雪山晚第四纪冰川发育的气候和构造耦合[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 701-710.]
- [10] Zhao Jingdong, Wang Jie, Shen Yongping, et al. Distribution and features of glacial landforms in the northwest of the Die Shan, west Qinling mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 841-847. [赵井东, 王杰, 沈永平, 等. 西秦岭迭山西北部冰川地貌分布及其特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 841-847.]
- [11] von Wissmann H. The Pleistocene glaciation in China[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1937, 17(2): 145-168.
- [12] Yang Jianqiang, Cui Zhijiu, Yi Chaolu, et al. “Tali glaciation” on massif Diancang[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(11): 1685-1692.
- [13] Zhao Xitao, Zhang Yongshuang, Qu Yongxin, et al. Pleistocene glaciations along the western foot of the Yulong Mountains and their relationship with the formation and development of the Jinsha River[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(1): 35-44. [赵希涛, 张永双, 曲永新, 等. 玉龙山西麓更新世冰川作用及其与金沙江河谷发育的关系[J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 35-44.]
- [14] Kong Ping, Na Chunguang, Fink D, et al. Moraine Dam related to late Quaternary glaciation in the Yulong Mountains, southwest China, and impacts on the Jinsha River[J]. Quater-

- nary Science Reviews, 2009, 28(27/28): 3224-3235.
- [15] Cui Zhijiu, Xie Youyu, Li Hongyun. Paleoglacial traces and series of Mutiglaciation in the Luoieshan Mountain [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(2): 107-118. [崔之久, 谢又予, 李洪云. 四川攀西螺髻山第四纪冰川作用遗迹与冰期系列[J]. 冰川冻土, 1986, 8(2): 107-118.]
- [16] Liu Gengnian. Research on glacial erosional landforms: case study of Luoieshan Mt. western Sichuan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1989, 11(3): 249-259, 287. [刘耕年. 川西螺髻山冰川侵蚀地貌研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(3): 249-259, 287.]
- [17] Zhang Wei, He Daiwen, Liu Libo, et al. Evolution of glacial trough and influence factors of the Qingshui Valley in Luoies Mountain, Sichuan Province [J]. Progress in Geography, 2014, 33(10): 1397-1404. [张威, 何代文, 刘丽波, 等. 四川螺髻山清水沟冰川槽谷演化及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1397-1404.]
- [18] Ma Qiuhua. Quaternary glaciation on the west slope of Mt. Gongga [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(1): 60-65. [马秋华. 贡嘎山西坡的第四纪冰川作用[J]. 冰川冻土, 1994, 16(1): 60-65.]
- [19] Owen L A, Finkel R C, Barnard P L, et al. Climatic and topographic controls on the style and timing of Late Quaternary glaciation throughout Tibet and the Himalaya defined by ^{10}Be cosmogenic radionuclide surface exposure dating [J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24(12/13): 1391-1411.
- [20] Wang Jie, Pan Baotian, Zhang Guoliang, et al. Late Quaternary glacial chronology on the eastern slope of Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau, China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(12): 1889-1900. [王杰, 潘保田, 张国梁, 等. 贡嘎山东坡中更新世晚期以来冰川作用年代学研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1889-1900.]
- [21] Zheng Benxing, Ma Qiuhua. A study on the geomorphological characteristics and glaciations in Paleo-Daocheng ice cap, western Sichuan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 23-32. [郑本兴, 马秋华. 川西稻城古冰帽的地貌特征与冰期探讨[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 23-32.]
- [22] Zhou Shangzhe, Xu Liubing, Cui Jjianxin, et al. Geomorphologic evolution and environmental changes in the Shaluli Mountain region during the Quaternary [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(23): 2480-2484. [周尚哲, 许刘兵, 崔建新, 等. 沙鲁里山第四纪地貌发育与环境演变[J]. 科学通报, 2004, 49(23): 2480-2484.]
- [23] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Wang Jie. Pleistocene glaciations in the Shaluli Shan and the influences of southwest monsoon on the glaciations during the Last Glacial period [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(5): 620-629. [许刘兵, 周尚哲, 王杰. 沙鲁里山更新世冰川作用及西南季风波动对末次冰期冰川作用的影响[J]. 第四纪研究, 2005, 25(5): 620-629.]
- [24] Ou Xianjiao, Lai Zhongping, Zeng Lanhua, et al. OSL dating of glacial sediments from the Qinghai-Tibetan Plateau and its bordering mountains: a review and methodological suggestions [J]. Journal of Earth Environment, 2012, 3(2): 743-756.
- [25] Fu Ping, Stroeve A P, Harbor J M, et al. Paleoglaciation of Shaluli Shan, southeastern Tibetan Plateau [J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 64: 121-135.
- [26] Zhang Zhigang, Wang Jian, He Yuanqing, et al. MIS 3 glacial advance of the paleo-Daocheng Ice Cap, southeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(5): 957-966. [张志刚, 王建, 何元庆, 等. MIS 3时期青藏高原东南部稻城古冰帽冰进事件研究[J]. 冰川冻土, 2017, 39(5): 957-966.]
- [27] Liu Shuzhen, Chai Zongxin, Chen Jiliang. Preliminary investigation on glaciation in Siguniang Mountainous region of Wenchuan County in Sichuan Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1986, 8(1): 72-82, 99. [刘淑珍, 柴宗新, 陈继良. 四川省汶川县四姑娘山地区冰川作用初步考察[J]. 冰川冻土, 1986, 8(1): 72-82, 99.]
- [28] Liu Beibei, Cui Zhijiu, Peng Xu, et al. Using ^{10}Be exposure dating to constrain glacial advances during the late glacial and Holocene on Mount Xuebaoding, eastern Tibetan Plateau [J]. Quaternary Research, 2018, 90(2): 348-359.
- [29] Bi Weili, Yi Chaolu. Review of ESR dating technique in Quaternary glacial chronology [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1292-1299. [毕伟力, 易朝路. ESR测年技术在第四纪冰川年代学中的研究综述[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1292-1299.]
- [30] Chai Le, Liu Liang, Xu Shan, et al. Quaternary glaciation of China, constrained by electron spin resonance dating [J]. Territory & Natural Resources Study, 2018(5): 62-65. [柴乐, 刘亮, 许珊, 等. 以ESR测年为约束的中国第四纪冰期序列研究[J]. 国土与自然资源研究, 2018(5): 62-65.]
- [31] Liu Jinhua, Yi Chaolu, Li Yingkui. Reconstruction of the neoglaciation glacier in the Qiangyong valley, Mt. Kaluxung, South Tibet [J]. Quaternary Sciences, 2018(2): 348-354. [刘金花, 易朝路, 李英奎. 藏南卡鲁峰枪勇冰川新冰期冰川发育探讨[J]. 第四纪研究, 2018(2): 348-354.]
- [32] Yi Chaolu, Cui Zhijiu, Xiong Heigang. Numerical periods of quaternary glaciations in China [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(5): 609-619. [易朝路, 崔之久, 熊黑钢. 中国第四纪冰期数值年表初步划分[J]. 第四纪研究, 2005, 25(5): 609-619.]
- [33] Zhao Jingdong, Wang Jie, Yang Xiaohui. Review, progress and prospect of the Quaternary glaciations in Eastern China (east to 105°E) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 75-92. [赵井东, 王杰, 杨晓辉. 中国东部 (105°E 以东) 第四纪冰川研究回顾、进展及展望[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 75-92.]
- [34] Liu Gengnian, Chen Yixin, Zhang Mei, et al. Glacial landform chronology and environment reconstruction of Peiku Gangri, Himalayas [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(5): 959-970. [刘耕年, 陈艺鑫, 张梅, 等. 喜马拉雅山佩枯岗日冰川地貌的年代学、平衡线高度和气候研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(5): 959-970.]
- [35] Strasky S, Graf A A, Zhao Zhizhong, et al. Late Glacial ice advances in southeast Tibet [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 458-465.
- [36] Bai Mingkun, Chevalier M L, Pan Jiawei, et al. Southeastward increase of the late Quaternary slip-rate of the Xianshuihe fault, eastern Tibet. Geodynamic and seismic hazard implications [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 485: 19-31.
- [37] Mix A C, Bard E, Schneider R. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG) [J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20(4): 627-657.
- [38] Cui Hang, Wang Jie. The methods for estimating the equilibrium line altitudes of a glacier [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 345-354. [崔航, 王杰. 冰川物质平衡线的估算方法[J]. 冰川冻土, 2013, 35(2): 345-354.]
- [39] Ran Zeze, Liu Gengnian. Rock glaciers in Daxue Shan, southeastern Tibetan Plateau: an inventory, their distribution, and

- their environmental controls [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12 (7): 2327-2340.
- [40] Liu Junnan, Liu Gengnian, Peng Xu, et al. Equilibrium line altitude distribution characteristics and influencing factors of modern glaciers in Yadong-Kangmar, Himalaya range [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54 (2): 398-406. [刘俊男, 刘耕年, 彭旭, 等. 喜马拉雅山亚东-康马段现代冰川平衡线高度、分布特征及影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 398-406.]
- [41] Xiao Jing, Liu Gengnian, Nie Zhenyu, et al. Glacial evidence of aridification in the Tianshan Mountains since Last Glacial [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40 (3): 434-447. [肖菁, 刘耕年, 聂振宇, 等. 天山末次冰期以来干旱化过程的冰川证据[J]. 冰川冻土, 2018, 40 (3): 434-447.]
- [42] Wang Xiaoru, Tang Zhiguang, Wang Jian, et al. Analysis of influencing factors of spatial difference of snowline altitude at the end of ablation season in the High Mountain Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41 (5): 1173-1182. [王晓茹, 唐志光, 王建, 等. 亚洲高山区融雪末期雪线高度空间差异的影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41 (5): 1173-1182.]
- [43] Liu Shiyin, Xu Junli. The second glacier inventory dataset of China (version 1.0) (2006—2011) [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2012. DOI: 10.3972/glacier.001.2013.db.
- [44] Su Zhen, Liang Dalan, Hong Ming. Developing conditions, amounts and distributions of glaciers in Gongga Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1993, 15 (4): 551-558. [苏珍, 梁大兰, 洪明. 贡嘎山海洋性冰川发育条件及分布特征[J]. 冰川冻土, 1993, 15(4): 551-558.]
- [45] Su Zhen, Shi Yafeng, Zheng Benxing. Quaternary glacial remains on the Gongga Mountain and the division of glacial period [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (5): 639-647. [苏珍, 施雅风, 郑本兴. 贡嘎山第四纪冰川遗迹及冰期划分[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 639-647.]
- [46] Kuang Mingsheng, Li Jijun, Zhao Yu, et al. A study on the quaternary glacial relics in the Gongwang Mountains in the northeast part of Yunnan Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19 (4): 366-372. [况明生, 李吉均, 赵瑜, 等. 云南省东北部拱王山第四纪冰川遗迹研究[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 366-372.]
- [47] Yi Chaolu. A preliminary research of geomorphological and depositional features of pleistocene glaciations in the east slope of Xiaoxianling Mountain in the Southwest of Sichuan Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11 (1): 76-81, 101. [易朝路. 四川西南部小相岭东坡更新世冰川地貌与冰川沉积特征的初步研究[J]. 冰川冻土, 1989, 11(1): 76-81, 101.]
- [48] Zhou Shangzhe, Wang Yaohua, Xu Liubing, et al. Past glaciation on the Longmen Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39 (2): 292-298. [周尚哲, 汪耀华, 许刘兵, 等. 龙门山古冰川作用[J]. 冰川冻土, 2017, 39 (2): 292-298.]
- [49] Wang Zongtai. Glacier dimension in China and its analysis method [J]. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 1992, 6 (4): 1-10. [王宗太. 中国冰川的规模及其评价方法探讨[J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(4): 1-10.]
- [50] Yao Tandong, Piao Shilong, Shen Miaogen, et al. Chained impacts on modern environment of interaction between westerlies and Indian monsoon on Tibetan Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32 (9): 976-984. [姚檀栋, 朴世龙, 沈妙根, 等. 印度季风与西风相互作用在现代青藏高原产生连锁式环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32 (9): 976-984.]
- [51] Peng Guikang, Li Zhiyou, Chai Fuxin. The relationship between topography and precipitation in Ya'an district [J]. *Plateau Meteorology*, 1985, 4 (3): 230-240. [彭贵康, 李志友, 柴复新. 雅安地形与降水的气候特征[J]. 高原气象, 1985, 4 (3): 230-240.]
- [52] Li Yueqing, Zhang Xiaochun. Main advances in the research of "Ya'an sky leakage" [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2011, 30 (4): 289-295. [李跃清, 张晓春. "雅安天漏"研究进展[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 289-295.]
- [53] Miao Qiuju, Xu Xiangde, Shi Xiaoying. Water vapor transport structure of anomalous rainy centers in the ambient area of Tibetan Plateau [J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30 (12): 44-47. [苗秋菊, 徐祥德, 施小英. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道[J]. 气象, 2004, 30(12): 44-47.]
- [54] Xin Huijuan, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. Inter-annual variation of temperature and precipitation gradient at the eastern slope of Yulong Snow Mountain [J]. *Earth Science*, 2012, 37 (Suppl 1): 188-194. [辛惠娟, 何元庆, 李宗省, 等. 玉龙雪山东坡气温和降水梯度年内变化特征[J]. 地球科学, 2012, 37(增刊1): 188-194.]

Reconstruction of glacial extent of the Zheduoshan Mountains, eastern Qinghai-Tibet Plateau and its climatic implications

YANG Shuran, YANG Weilin, HAN Yesong, YANG Yanmin,

LI Mengzhen, CUI Zhijiu, LIU Gengnian

(MOE (Ministry of Education) Key Laboratory for Earth Surface Processes (LESP), College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Zheduoshan Mountains is located in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, in the transition zone from plateau to mountains and valleys, with well-preserved glacial landforms. It is of great significance to study the glacial landforms to reveal the coupling mechanism between the evolution of topography and paleoclimate change in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. On the basis of field investigation, combined with Google Earth remote sensing image, The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0), glacial landforms and its characteristic parameters are identified and calculated. A total of 189 ancient glaciers were identified, covering an area of 497 km². Based on the available chronological data, the glacial landforms in the study area are mainly remains of glaciations since the last glacial maximum (LGM). The results show that the height of LGM glacier equilibrium line (ELA) is 4 380 m on the west slope and 4 110 m on the east slope, with a difference of 270 m, indicating that the east side of the watershed is more favorable for glacier development. The widely developed glacial lakes, glacial bedrock surface, roche moutonnée, etc., and deep glacial trough (U-shaped Valley) indicate the characteristics of temperate (marine) glaciation; the positive glaciation amplitude, glacial valley orientation and erosion landforms reveal that the terrain conditions and water vapor sources in the accumulation area have an important impact on the development of glaciers in the study area.

Key words: eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau; Zheduoshan; glacial landforms; paleoclimate

(责任编辑：赵井东)