

国家自然科学基金（40602018）资助

冰消期地貌

徐兴永 于洪军 著

 海洋出版社

国家自然科学基金（40602018）资助

冰 消期地貌

徐兴永 于洪军 著

海洋出版社

2012年·北京

图书在版编目(CIP)数据

冰消期地貌 / 徐兴永, 于洪军著. —北京:
海洋出版社, 2012. 9

ISBN 978 -7-5027-8162-0

I. ①冰… II. ①徐… ②于… III. ①海蚀地貌
IV. ①P737.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第259171号

Bingxiaoqi Dimao 冰消期地貌

责任编辑: 白 燕 王 溪

责任印制: 刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月北京第 1 次印刷

开本: 889mm × 1194mm 1 / 16 印张: 15.5

字数: 340 千字 定价: 98.00 元

发行部: 010-62147016 邮购部: 010-68038093 专著图书中心: 010-62113110

海洋版图书印、装错误可随时退换

古冰川遗迹的研究,过去侧重于冰川侵蚀地貌与堆积地貌的调查与研究。侵蚀地貌莫过于对角峰、刃脊、哑口、古粒雪盆、古雪线高度、羊背石、冰坎、夷平面、冰川擦痕、磨光面、“U”型谷等地貌特征的调查;而堆积地貌则主要包括:由古冰川活动而形成的漂砾、侧碛、中碛、终碛,以及由表碛、内碛和底碛共同堆积而成的冰碛物堆积地貌。当然,古冰川堆积物的沉积结构(还可分出冰砾埠、冰砾埠阶地等)等物性特征,也属于古冰川研究的内容。此外,冰碛物的物质组成、测年、孢粉分析、分布状况、冰期划分、古冰川湖中的季候泥分析、古气候变动等也是古冰川的研究内容。

过去对冰消期的认识,只限于冰川融水能使全球海面升高,而对于冰消期的动力特征以及由此产生的地貌类型,则缺乏系统的描述与研究。也就是说,过去只强调冰期时期形成的冰川地貌,在某种程度上忽视了冰消期所形成地貌特征的探究。为弥补这一不足,本书则着重于对历次冰消期所形成的多种地貌进行系统的分析与研究。不言而喻,本书属于“冰川活动区冰消期古地貌的研究”,从而有别于过去古冰川遗迹的研究内容。

更新世期间究竟发生过多少次冰期和间冰期,这是地质学界尚未解决的问题。从20世纪初以来,对于更新世期间的冰期划分,存在4次到6次的经典冰期划分与用氧同位素法而建立的多冰期轮回相争,每一经典冰期又包含若干个次一级冰期。不论如何划分,只要有冰期,就肯定存在冰消期。

作者认为:冰臼和冰川融水冲蚀痕等都是冰川融水活动而形成的地貌类型。它们都不是通过古冰川活动直接形成,而主要是进入冰消期以后,在“较短”时期内形成的。也就是说,巨砾(漂砾)的搬运与移动是冰川活动的结果,而冰碛物的再改造则主要是冰消期冰川融水活动的贡献。从现在发现的冰臼来看,有的冰臼非常圆,表明它们十分年轻,可能属于最后冰期的形成物;有的冰臼已经是支离破碎,失去原来的圆形特征,显得“十分苍老”,表明它们已经过多次古冰川活动改造了。

根据近100万年内海洋底层沉积物中所含有孔虫壳体的氧同位素的测量发现,全球气候大约以10万年为一个周期交互出现。这种冰期与间冰期周期性转换的最大特征,就是从间冰期进入冰期的过程非常缓慢,但是从冰期进入间冰期却非常迅速。换句话说,冰盖的扩大过程将近10万年;而冰盖从缩小至消失则仅需几千年,至多为万年左右。以最后冰期为例,冰期时间要长达数万年,而冰消期是从距今15 000 a开始,大约在距今7 000~8 000 a结束。几万年聚集而成的冰层要在数千年内消融,再加上正常的降水,冰消期

的径流量可能相当于现代径流量的10倍，也许还要多一些。最后冰期结束时的冰消期，已为人类的祖先所察觉，所以在世界各文明古国都有古代洪水活动的记述。

冰川融水穿过冰面上的洞穴时，受地球自转影响会产生旋转流，在冰川融水及其携带的大量碎屑的冲蚀下，基岩或砾石上就会形成冰臼；如旋转流的位置发生位移，就会出现双眼冰臼、相交冰臼、相连冰臼或冰臼群；如洞穴的直径扩大，还有可能形成环型冰臼。十分明显，冰川融水在完成一系列造貌活动之后，才能在冰川前缘汇合起来，形成冰水沉积。

关于冰臼的成因，有的研究者认为冰臼是印第安人用火烧后又经人为开凿而成的，有的主张是溶蚀而成，还有河流成因等观点，真是众说纷纭。1874年，挪威人Brøgger 和 Reusch开始对冰臼的成因进行探索，认为冰臼的形成与过去的冰川活动有关。

国外地质学家经过近半个世纪的调查和研究，到20世纪30年代基本上已查明冰臼的形成与冰川融水的侵蚀作用有关。并经过实验研究，从理论上论述了冰臼形成的机理与过程。通过大量的调查发现，那些分布在山脊上或山顶上的冰臼与河流的活动无关。到20世纪50年代，国外在学术界基本上统一了认识，如美国将冰臼作为国家级或州级地质公园中的景点加以开发，并作为科学普及的材料。

值得注意的是，20世纪末在挪威发现位于现代冰川刚刚退缩而出露的冰臼，也就是在冰川底部的磨光面上发现了冰臼。这一发现，更进一步证明了冰臼的形成与冰川融水活动密切相关。

我国关于冰臼的研究起步较晚，1997年韩同林等在河北和内蒙古首次系统地提出冰臼问题。由此可以看出，在该领域内与国外的差距至少有半个世纪。本书作者相信，国内关于冰臼成因的争论，不会再需要太久的时间了。

如果冰川活动区靠近陆架，冰碛物和冰水沉积物就成为陆架上的重要物源。黄海陆架区的矿物分析已经发现沿山东半岛南侧分布的石英条带，宽达百余千米，其原因就在于崂山、槎山等山地丘陵的基岩均由花岗岩组成，由花岗岩组成的大量冰碛物和冰水沉积物已影响到现代陆架区。

20世纪90年代在海洋地质学界提出了晚更新世末期陆架沙漠化问题，阐述了距今18 000 a前，黄海、渤海、东海的环境特征，发现了众多的海底沙丘、沙海地貌；也有的研究者在内陆架海区发现了许多古河道遗迹。这两种不同的论述，都正确地描绘了海底地貌特征。因为前者描述的是冰期时期的

陆架环境特征,后者则是冰消期陆架环境所具有的地貌类型。

进入冰消期,由于冰川补给区逐渐萎缩,冰川消融区不断扩展。冰川开始快速融化,大量的冰川融水形成冰面河、冰内河、冰底河。毫无疑问,进入冰消期以后,冰川剖面上的冰融水是造貌作用的最主要营力。如果说冰臼是需要旋转流的情况下形成的特殊地貌现象,大量冰川融水应该形成更广泛、更常见、更普遍存在的流水侵蚀地貌,这一特定的造貌过程可称为冰消期效应。当自上而下的旋转流到达基岩面或漂砾面时,就会形成特殊的冰臼,而不具备旋转流特征冰融水就会把漂砾或基岩冲击成多种地貌类型。所以在冰川活动区,除形成冰臼外,还应当存在更多的与冰水活动有关的其他融水侵蚀地貌,如:冰水冲蚀槽、基岩面上的条纹沟、冰水夷平面、冰水喀斯特(雪蚀地貌)、冰融水冲蚀变形石(桃形石、扁平石等)、冰融水流痕沟等多种地貌类型。进入冰消期,古冰川活动区冰川融水形成的地貌以及冰水沉积等都属于“冰消期地貌学”的研究内容。

冰臼的形成与岩性无关,并不是花岗岩地区特有的地貌现象。从世界各地的情况来看,冰川覆盖过的灰岩、花岗岩、沉积岩、火山岩等地区都有冰臼形成。所以说,只要冰融水所形成的动力条件具备,不论岩性如何、海拔高度如何,都有可能形成冰臼。

冰消期冰川融水地貌的研究,是近几年来对山东丘陵、浙江、福建古冰川遗迹考察过程中,特别是对崂山古冰川遗迹考察过程中新发现的研究内容。它们从不同的侧面都证明了山东丘陵、浙江、福建等地区发育过古冰川作用,冰消期存在自上而下的水体,来自巨厚冰川上的融水形成了大量冲蚀地貌。

值得一提的是,最近在崂山卧龙村南侧山谷口终碛堤后的冰碛物夹层中发现了季候泥沉积,层偶由深色和浅色韵律层组成,层偶清晰可辨,展示了冬、夏不同季节的沉积特征。季候泥的形成与保存都再次证明崂山地区存在低海拔型古冰川活动遗迹,从而也验证了李四光等老一辈地质学家、古冰川学家关于中国东部低山丘陵区存在古冰川活动的认识是正确的。

冰消期效应对我国陆架的地形特征也产生重要影响,如:过去在陆架上发现过许多粗砂、砾石沉积(连云港云台山以南的海岸地带的更新世地层、青岛浮山湾前到薛家岛、庙岛列岛的砾石滩、崂山和槎山的冰碛海岸及海岸冰臼、崂山东侧的冰碛小岛、灵山岛附近的水下大规模沙砾沉积、山东荣成沿岸埋藏的晚第四纪含砾沉积物等),这些都与山东丘陵一带的古

冰川活动有关。另外，在胶州湾口、北隍城岛北侧的渤海海峡都出现了落差超过 50 m 的深槽，它们可能是巨量洪水（冰川融水和大气降水）形成的跌水，也就是当时的瀑布，全新世海侵后又将其覆盖，跌水消失，留下深槽。2005 年在天津大沽口以东晚更新世末期形成的埋藏槽谷，宽达几百米到 1 km，深约 30 m，可能是冰消期的洪水通道。

冰消期地貌学的出现，将会大大推动我国东部古冰川活动的研究，同时也将促进我国东部古环境变迁史的探索。目前，中国东部低山丘陵区是否存在古冰川遗迹尚有争端。本书用大量图片展示山东丘陵（尤其是崂山）、福建、浙江等地区古冰川遗迹和冰消期地貌特征。近年来，关于古冰缘环境的研究取得了很大进展，在成都平原、山西大同、内蒙古等地发现了大量的古冰楔地貌，说明冰期时期的降温幅度可能超过我们目前的认识，至少可以达到 18℃。自然界是非常复杂的，我们对古寒潮活动强度的认识还是不够的，为何冰期时代的古寒潮活动会那样频繁，竟能使崂山一带更新世初期的古雪线高度降到现在海拔百米以内，这是值得进一步探讨的问题。

本书分为十一章；第一章古冰川地质学的形成与发展；第二章冰臼的形成；第三章崂山地区冰臼；第四章鲁、苏沿岸山地冰臼；第五章福建地区冰臼；第六章浙江省等地区冰臼与石林；第七章冰水冲蚀地貌；第八章季候泥沉积与冰碛海岸地貌；第九章山东丘陵古冰川堆积地貌；第十章我国东部低山丘陵区的漂砾；第十一章中国东部陆架第四纪沉积环境。参加野外调查和本书编写的有：赵松龄、李萍、王树昆、苏乔、易亮、陈广泉、姚菁等，许多资料的获得与他们的密切配合、辛勤劳动有关。野外调查过程中得到浙江新昌徐跃龙先生等的帮助；编写过程中与石油大学吕洪波教授进行了有益的讨论，初稿完成后，吕洪波教授对全文进行了审阅并提出修改建议；海洋出版社的白燕主任和王溪编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此一并向他们致谢。在资料的收集过程中，还从网上下载了一些图片资料，我们尽量标明出处，在此一并致谢。本书仅涉及山东半岛、江苏、浙江和福建的若干山地发现的古冰川遗迹，更多的古冰川活动遗迹尚待发现。限于我们的水平和精力有限，不当之处在所难免，敬请各位专家和广大读者批评指正。

徐兴永

2011年9月

第一章 古冰川地质学的形成与发展 (1)

第一节 国外古冰川地质研究史	(1)
第二节 国内古冰川地质研究史	(3)
第三节 中国东部古冰川遗迹的研究	(7)
一、中国东部古冰川研究历史	(7)
二、山东丘陵一带古冰川遗迹的新发现	(10)
第四节 冰与冰川冰的物理特征	(19)
一、粒雪的形成	(19)
二、冰川冰的物理性质	(20)
三、冰川运动	(21)
第五节 雪线的影响因素	(22)
一、影响雪线高度的主要因素	(22)
二、关于中国东部冰期时期低海拔雪线问题	(24)
三、关于冰川上的平衡线问题	(25)
四、中国南方的雪灾	(25)

第二章 冰臼的形成 (26)

第一节 冰臼的定义	(26)
一、冰臼	(26)
二、混合型冰臼	(26)
第二节 冰臼研究史	(28)
第三节 冰臼成因	(30)
一、“人为因素”形成冰臼	(30)
二、自然因素形成冰臼	(31)
三、正在活动中的冰洞与冰裂隙	(34)
四、冰川湖底保存着冰臼	(36)
五、全球气候变暖而暴露出来的冰臼	(36)
第四节 我国对冰臼的发现与研究	(38)
一、我国冰臼的发现历史	(38)
二、近期新发现的冰臼	(38)

第三章 崂山地区冰臼 (50)

第一节 山顶发育的冰臼	(50)
-------------	------

一、天波池·····	(50)
二、鹤山沫浴盆·····	(51)
三、瑶池冰臼群·····	(52)
四、仰天池·····	(53)
五、低海拔丘顶发育的冰臼·····	(54)
六、其他典型冰臼·····	(54)
第二节 崮顶发育的冰臼·····	(62)
一、自然碑·····	(62)
二、翠屏岩·····	(63)
三、其他崮顶冰臼·····	(64)
第三节 漂砾上发育的冰臼·····	(71)

第四章 鲁、苏沿岸山地冰臼····· (78)

第一节 鲁中山地·····	(78)
一、泰山冰臼·····	(78)
二、峰山冰臼·····	(79)
三、沂山冰臼·····	(83)
第二节 鲁东山地·····	(85)
一、圣经山冰臼·····	(85)
二、招虎山冰臼·····	(86)
三、乳山山顶上的冰臼·····	(88)
四、槎山冰臼·····	(88)
五、大珠山冰臼·····	(90)
六、浮山冰臼·····	(91)
七、大泽山冰臼·····	(93)
第三节 江苏孔望山·····	(94)

第五章 福建地区冰臼····· (96)

第一节 中国南方地区冰臼成因·····	(96)
第二节 福建地区的冰臼·····	(97)
一、开口型冰臼·····	(97)
二、圆形冰臼·····	(99)
三、锥形冰臼·····	(107)

四、冰川刻蚀作用·····	(108)
五、白中白型冰臼·····	(109)
六、带有明显螺旋纹的冰臼·····	(109)
七、单冰消期形成的冰臼·····	(110)
八、多冰期的冰消期形成的冰臼群·····	(112)
九、星罗棋布的冰臼群·····	(113)
十、山坡与谷坡上的冰臼·····	(117)
第三节 高起的终碛垄岗与谷底岩坎·····	(118)
一、高起的终碛垄岗·····	(118)
二、谷底岩坎·····	(119)

第六章 浙江等地区冰臼与石林····· (120)

第一节 浙江新昌地区冰臼·····	(120)
第二节 浙江舟山群岛上的冰臼·····	(122)
第三节 江西地区的冰臼·····	(125)
一、庐山冰臼·····	(125)
二、上饶县平富乡冰臼·····	(125)
第四节 冰消期的冰川石林·····	(126)
一、北方的冰川石林·····	(126)
二、辽东半岛冰峪中的石林·····	(129)
三、南方的冰川石林·····	(133)

第七章 冰水冲蚀地貌····· (138)

第一节 冰水冲蚀地貌类型·····	(138)
一、冰水流痕槽·····	(138)
二、冰水流痕槽的地貌形态·····	(139)
三、冰水冲蚀槽(冰帘痕)·····	(148)
四、冰水夷平面·····	(149)
五、冰下河床型侵蚀槽·····	(150)
第二节 福建地区冰水冲蚀地貌·····	(151)
一、冰水冲蚀槽·····	(151)
二、融水侵蚀槽·····	(154)

第八章 季候泥沉积与冰碛海岸地貌	(155)
第一节 崂山古冰川湖中季候泥沉积的发现	(155)
第二节 冰碛海岸地貌	(159)
第九章 山东丘陵古冰川堆积地貌	(168)
第十章 我国东部低山丘陵区的漂砾	(179)
第一节 鲁、苏、浙山地漂砾的形态特征	(179)
第二节 古冰川漂砾堆积地貌	(201)
第十一章 中国东部陆架第四纪沉积环境	(205)
第一节 中国东部地区古冰缘地貌	(205)
一、冰缘地貌的古气候意义	(205)
二、冰缘地貌的基本类型	(206)
三、中国东部及邻区古冰缘地貌类型	(208)
四、冰楔、砂楔、冰卷泥等冰缘地貌类型	(212)
第二节 中国近海陆架古冰缘地貌	(215)
一、斑块状分布的塌陷沉积	(216)
二、冰缘揉皱结构	(217)
三、类冰楔型沉积结构	(218)
四、冰期时期冰缘环境中的喜冷动物群分布	(218)
五、中国东部及近海陆架区古冰缘界线的确定	(220)
第三节 中国东部最后冰期时期的气候环境	(221)
一、最后冰期的降温幅度问题	(221)
二、数值模拟的结果	(222)
三、中国东部末次冰盛期的气候环境	(222)
第四节 最后冰消期对陆架沉积环境的影响	(224)
一、最后冰消期近海陆架环境特征	(224)
二、最后冰消期近海陆架沉积特征	(224)
三、冰消期对陆架沉积环境的影响	(226)
参考文献	(227)
后 记	(235)

第一章 古冰川地质学的形成与发展

第一节 国外古冰川地质研究史

随着对冰川与冰川遗迹认识的提高和调查资料的积累,终于导致冰川地质学的产生与发展。1750年A.C.博尔迪埃描述了冰的塑性,为冰川运动的研究奠定了理论基础。1779年法国的苏萨里,首次使用“漂砾”一词,解释侏罗山石灰岩上的花岗岩漂砾的成因。其实,这种现象在我国也存在,但至今尚未被认识与开发(如:山东沂源县芝芳沟十八转谷地中,有一花岗岩形成的终碛横在谷口,至今其残存高度仍然有数米,而谷地的两侧竟为石灰岩,谷底为石灰岩块与花岗岩块的混合堆积,表明当地曾被古冰川所覆盖,来自沂水源头的巨大的冰川舌,带着花岗岩块曾延伸到鲁山南侧的十八转谷地)。

1795年,英国的赫顿提出这些漂砾是由冰川搬运而来的。1832年德国的伯恩哈德提出北欧大陆曾发生过大规模冰川作用。1837年瑞士的阿加西提出“大冰期”概念和冰期术语,并在1841年开始用一系列的精密测量来确定冰川的移动规律,首次发现冰川两侧的移动速度比中部慢,而冰川中部的移动速度又比终点快。随着欧洲、北美洲与阿尔卑斯分布的陆地冰川和山地冰川的发现以及冰期/间冰期理论的不完善,为冰动型海面变化理论的形成奠定了基础。

1842年,玛克拉仁认为冰体的融化,必然要引起海面的升起。1852年,英国的兰姆赛论证了苏格兰和威尔士古冰川作用的地层中有两次冰期的遗迹;1858年,瑞典的希尔发现在两次冰期之间的沉积层中确有温暖气候带的植物化石群遗迹,称“间冰期”。

1901年,德国A.彭克和瑞士E.布吕克纳在阿尔卑斯山前和山麓地带划分出了由4次冰川作用的“冰碛物”所组成的沉积系列,并以慕尼黑以西多瑙河的4条小支流的名称命名,即恭兹(Gunz)、民德(Mindel)、里斯(Riss)和玉木(Wurm)(最后)冰期。冰期时冰体大多以分散的山谷冰川的形式出现,而没有形成整个冰盖(大陆冰川与山地冰川连成一片时,冰川可分布到山体以外),有些冰川向下延伸到阿尔卑斯山南北两侧的平原地区,形成了巨大的冰舌。他们把冰期与冰期之间的冰退时期称为间冰期,也就是暖期。值得提出的是,彭克在阿尔卑斯所创立的第四纪冰期,为四大冰期,即所谓经典的四大冰期划分法。20世纪30年代戴里从冰动型的海面变化,进而提出“冰川控制论”。他认为海面变化是由于气候变化引起的,温度的升高破坏了大洋水、大气水和陆地降水之间的平衡。当温暖的间冰期气候变为寒冷冰期气候时,大面积的降水由雨变为雪,由雪转化为粒雪,再从粒雪变为粒冰,从粒冰集成冰川冰,停留在陆上积累成冰盖而不返回海洋,从而使海洋失去平衡,海洋水体体积的不断缩小,导致海面下降。1936年赫斯主张:由于地球自转速度的增大而引起低纬度地区的海面上升,而在高纬度地区海面发生下降。

随着冰碛物研究资料的积累,又于1950年提出阿尔卑斯地区早于恭兹冰期的存在,它们被命名为多瑙(Donau)冰期和拜伯(Biber)冰期,这些更老的冰川事件的确切年代还有待于进一步确定。后来,在北美、中国东部低山丘陵区也找到与之对应的冰期与此同时,北欧、北美的4次冰期也得到验证。

20世纪50年代以来,放射性碳、钾—氩法、铀系法、裂变径迹法测年及氧同位素测温等技术的应用,使第四纪地质研究达到新水平。1963年考克斯(A. Cox)建立古地磁年表,为第四纪磁性地层的划分与对比提供了依据。大陆与大洋沉积序列研究,更新了传统的4次冰期概念。1977年库克拉(G. Kukla)等对捷克布尔诺黄土的研究证明,在奥尔杜韦古地磁事件以来的170万年里出现了17次间冰期,平均每10万年有1次冰期—间冰期气候旋回。印度洋、赤道大西洋、加勒比海的海洋沉积研究,也得出相近的结论。

国外古冰川的研究成果,已广泛运用于全球海面变化、全球环境变化中,如:R.F. Flint认为冰期最盛时全球约有 $7\,697 \times 10^4 \text{ km}^3$ 的冰川,现在仍然有 $2\,625 \times 10^4 \text{ km}^3$ 的冰川分布于地球的两极、格陵兰、冰岛以及其他一些中高纬度的高山地区。寒冷的冰期气候,使全球的降水形式发生变化,中高纬度的降水主要以降雪形式出现。每年降雪的积累量超过了融化量,使冰川与冰盖的形成与发育得以顺利进行。海洋失去了水量破坏了平衡,致使世界洋面大幅度降低,陆架大面积出露,使陆地面积增大、海洋面积缩小。

末次冰期的最盛时期,相当于距今18 000 a前后,那时北美洲的大部分地区为劳伦泰德冰原所覆盖,其面积为 $12\,535\,600 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。冰川面积仅次于南极冰盖,它的南界可到达美国大湖区以南,相当于 38°N 附近;它的东部边缘已进入大西洋陆架区;北部接近北极;西部与柯迪纳那冰原相连接。柯迪纳那冰川覆盖了加拿大西部的山地地区,以及属于该山系之间的平原区,向西可达阿拉斯加,其面积可达 $2\,266\,250 \text{ km}^2$,这样北美洲主要冰川的面积达 $14\,801\,850 \text{ km}^2$,厚度达3 000 m。如此巨大冰盖的形成,是导致世界洋面降低的主要因素。据估计在距今12 000 a前后,北美的冰川面积已经融化了2/3以上,大约在距今7 000 a时劳伦泰德冰原全部消失,从此以后,大幅度的海面的变化不再出现,代之而起的应当是起伏较小的升降变动。

最后冰期时期的欧洲,冰川覆盖面积达 $4\,960\,600 \text{ km}^2$,主要为斯堪的纳维亚冰原所覆盖,其面积为 $4\,274\,350 \text{ km}^2$,其他地区冰川范围较小,累计起来仅有 $686\,250 \text{ km}^2$,相当于斯堪的纳维亚冰原的16%。此外,在乌拉尔山以西的西北利亚地区仍有冰川分布,其面积可达 $2\,165\,240 \text{ km}^2$,相当于斯堪的纳维亚冰原之半,但冰川厚度小,其所属冰川体积仅为其10%。

由于大陆冰川形成的冰碛物,具有非连续沉积的特征,地质学家无法知道古气候的连续变化,于是地质学家转向了深海沉积。因为只有深海沉积才不受海面变动和其他内、外营力的影响。1947年,尤里(H. Urey)提出用同位素方法能测定古温度的变化。其基本原理为海水中的氧存在3种不同的同位素,当水分蒸发之际, ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O 逸出的速度不同, ^{16}O 为轻同位素,当水汽蒸发时被逸出的量大,而留下较多的重同位素。冰期时期,大陆冰川和山地冰川都得到迅速的发展,使海洋失去部分水体。以现代大洋水的同位素比值作为标准,大陆冰川的冰常常是很轻的(以 $\delta^{18}\text{O}$ 的负值表示,可达-4%或更多)。冰期时海洋留下了含重同位素的水(以 $\delta^{18}\text{O}$ 的正值表示,可达+5% ^{18}O)。

冰期时含有少量同位素的冰盖在北美形成劳伦泰德冰原,在欧洲发育斯堪的纳维亚冰原,在世界上的高山地区堆积成多种类型的高山冰川和山地积雪,海洋不断失去水体,并缩小其体积,含盐量稍有增加,同位素值逐渐上升,即 ^{18}O 发生浓缩,这一微小变化的发现成为进行古温度测量的理论根据。

在海洋环境中发育而成的有孔虫,在其生长过程中,吸收浓缩了的氧同位素。由于 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 的比值与壳体形成时的温度有关,经过系统的 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 比值的测量,就可以发现这一比值在剖面上的变化,再通过一系列的运算就可以恢复特定海域的海水温度变化。一般来说,水温降低 1°C , ^{18}O 的含

量增加0.02%。这一微小的变化对于古气候学家来说是至关重要的。

20世纪50年代, 艾米立安尼(C. Emiliani)首先提出并绘制了第一条42万年以来海洋温度变化曲线, 并首次建立了氧同位素分期, 第一期为全新世, 第三期为最后冰期的亚间冰期, 第五期为最后间冰期。以此类推, 曲线上偶数代表冷期, 奇数代表暖期, 两个同位素分期的界线放在温度的高峰与低峰之间。在1955年完成的古温度曲线上, 把近42万年的温度记录分为13期。在艾米立安尼最初的工作里, 他认为所观察到深海沉积物内浮游性有孔虫氧同位素的变化里, 约有1/3是由于两极冰川的胀缩引起的, 2/3是由海水本身的温度造成的; 可是随后的研究却大幅修正了他的看法。现在一般认为, 在深海沉积物内浮游性有孔虫氧同位素的变化, 约有2/3是由于冰川的胀缩引起的, 1/3才是由海水本身的温度造成的。

1973年, 萨克里东(N. J. Shackleton)等获得一条新的氧同位素曲线, 该孔研究了近87.0万年以来的古温度变化, 共划分为23期。后来, 地质学家还发现某些地区的冰芯也具有连续记录的特征, 获得与深海岩芯类似的成果。

从20世纪50年代最初提出的氧同位素曲线来看, 第四纪期间究竟发生过多少次冰期/间冰期轮回, 已经成为一个新的争论问题。十分明显, 来自深海岩芯的氧同位素记录, 至少展示了近200万年中曾发生过多达数十次冰期性气候变化, 与经典的第四纪只有四五次冰期的理论不一致, 于是在第四纪研究领域内产生了多冰期轮回说与经典的四大冰期轮回说的长期争论。随着冰芯和洋底钻孔分析资料的出现, 以新技术为基础的氧同位素分析法有取代经典冰期划分的趋势。但是, 对于山区的古冰川活动的研究, 特别是以冰碛物为主体的冰期/间冰期研究, 经典划分法仍具有广泛的应用价值。有些研究者, 为了减缓和缩小两种方案的分歧, 又提出了里斯Ⅰ、里斯Ⅱ、玉木Ⅰ、玉木Ⅱ乃至玉木Ⅲ之类的“亚冰期”, 但最终还是要保持原来的四分法方案。

第二节 国内古冰川地质研究史

中国的冰川地质研究起步较晚。1907年, 美国地质学家威利斯等发现古生代南沱冰碛层, 后被李四光订正为震旦纪。李四光教授是我国第四纪冰川学研究的奠基人。1922年, 李四光在大同盆地和太行山东麓等处, 发现漂砾(冰碛物中较大的冰碛石), 有些漂砾上留下了经冰川磨擦形成的条痕, 并据此断定其为冰川作用的产物。1931年李四光到庐山考察, 首先发现这里的第四纪冰川遗迹, 对山上及山麓的冰碛物尤其重视, 为证明其第四纪冰川活动的存在, 他于山上山下反复搜集证据。1933年, 他又在位于 $29^{\circ}30'N$, $116^{\circ}00'E$, 海拔1480 m的庐山上发现了冰川地形, 如: 在庐山大月山西侧发现了大坳冰斗群, 在汉阳峰之东发现了五乳寺、鼓子寨冰斗群, 后来又在仰天坪之北发现了黄坳冰斗群。这些古冰斗群海拔标高约1200 m, 代表了古雪线高度。冰斗中的粒雪集聚到40 m以上时, 底部便开始形成冰层, 冰层不断地向后扩展挖掘, 最终形成前边有冰坎的冰斗。芦林湖、三逸乡(植物园)、黄龙寺曾是古冰窖的所在地, 是庐山上储冰的场所。外观形态与冰斗相似, 但比冰斗范围大得多, 高度也稍低一些。

李四光(1952)还在位于长江南岸($30^{\circ}32'N$, $117^{\circ}40'E$)的九华山也同样发现了形态表现很好的冰川地形。在九华山的顶部有标准的向北开口的冰斗, 而后过渡到冰川槽谷, 谷底有无数的漂砾。谷底漂砾巨大, 超过切割这一冰川槽谷的现代河流所搬运的漂砾群多倍。根据李四光的调查, 在长江下游地区曾有过3次冰川作用。其中, 发生最古和分布最广泛的一次他称为“鄱阳湖”冰川

作用，随后是“大姑”冰川作用。第三次是“庐山”冰川作用。从异处过来的泥石叫“冰碛泥砾”或称为“漂砾”。经调查获得的图1-1、图1-2和图1-3，足以证明庐山存在古冰川活动遗迹。



图1-1 庐山西谷叠石



图1-2 庐山上的漂砾

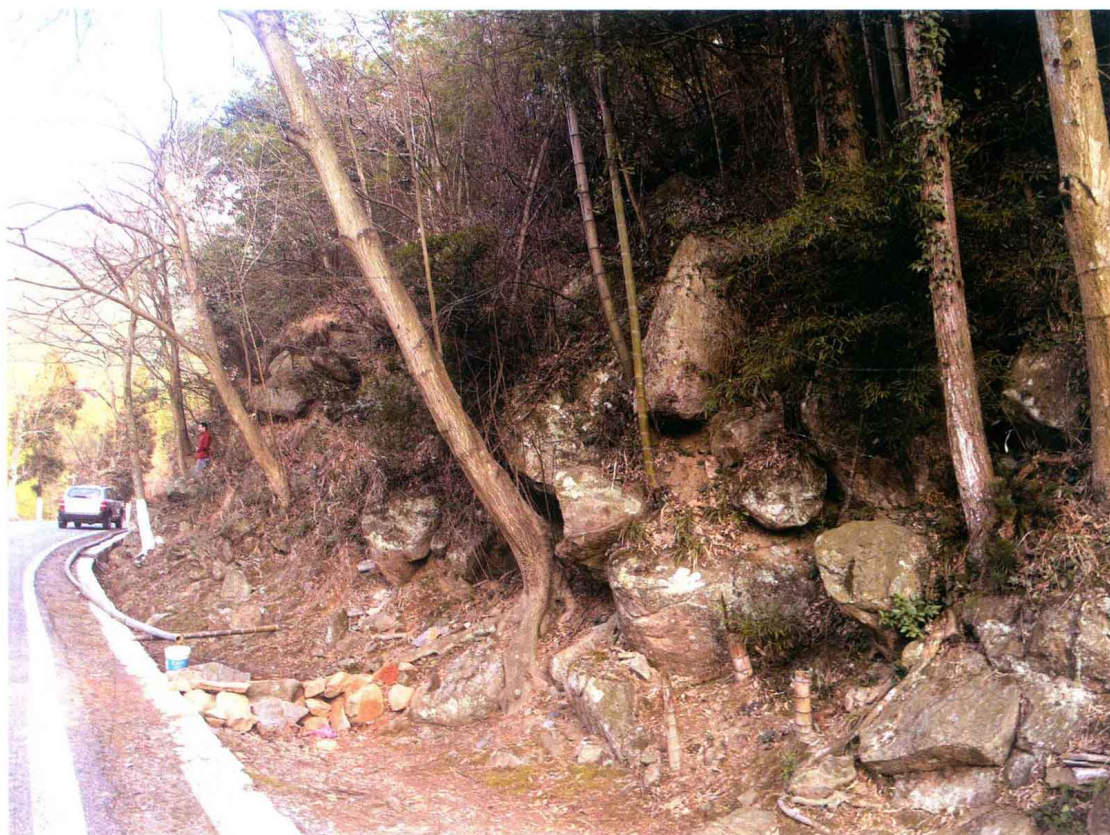


图1-3 庐山冰碛剖面

李四光先生从冰川地貌、冰碛物及冰溜遗迹三方面论证了庐山第四纪冰川的存在之后，又根据冰碛物的特征和分布特点，研究了第四纪冰川作用的历史，把庐山第四纪大冰期划分为3个亚冰期。他认为庐山冰碛物中棕色坚硬泥砾，代表了最老一次冰期的堆积物，命名为鄱阳湖冰期；赭色疏松泥砾，代表了较新一次冰期的堆积物，命名为大姑冰期；分布在庐山800 m以上的、黄色极疏松的泥砾，代表了最新的次冰期的堆积物，命名为庐山冰期。其中，大姑冰期规模最大，冰流直达山麓地带，庐山冰期是规模较小的山谷冰川，冰流活动仅限于海拔800 m以上。

李四光先生将这些观点于1937年写成《冰期之庐山》专著。因为抗日战争爆发，直到1947年才得以在国立中央研究院地质研究所专刊的形式正式发表。这部专著在国内影响很大，为中外许多学者所承认，在我国大专院校有关教科书中被广泛应用，庐山成为我国研究第四纪冰川的标准地点，作为第四纪冰期对比的依据。后来李先生在安徽的黄山、浙江天目山等地，陆续发现第四纪冰川遗迹。如此，中国东部存在第四纪冰川地质作用的观点，为更多的人所接受。

总而言之，李四光于1921年已在山西大同及河北太行山东麓发现了冰川漂砾，识别出冰川流动形成的擦痕。20世纪30年代，他又在江西庐山发现冰川沉积物，在鄱阳湖边发现具冰川擦痕的羊背石；并在安徽黄山发现“U”型谷削壁上的擦痕和具有擦痕的漂砾。在这些重要发现后，李四光先后发表了“扬子江流域之第四纪冰期”和“安徽黄山之第四纪冰川现象”等论文，以后又出版了专著《冰期之庐山》，为中国第四纪冰川学研究奠定了基础。20世纪40年代他还考察了川东、鄂西、湘西、桂北和贵州高原等地，发表了一系列有关论述冰川遗迹和冰期划分的论著。50年代在北京西山地区鉴定了多处冰川遗迹，并在60年代初亲自规划和主持全国的第四纪冰川研究工作。随后又发表专文，指明古冰川应提出三项必不可少的冰流侵蚀、堆积和冰缘证据和一项反映寒冷气

候的动植物证据来加以验证，并倡导第四纪冰川研究要结合生产建设，为国民经济服务。在20世纪的60年代初，李四光教授还根据华北平原10 000多口井的钻井资料，发现太行山东麓的华北平原存在埋藏型冰碛物。这一思路对于陆架古环境的研究产生重大影响。北黄海周边山地和太行山在同一纬度，北黄海海底是否也存在埋藏型冰碛堆积，这是值得进一步探究的事。更新世时期，全球气候曾有数次冷暖变化，冰川作用随之重复发生。气候寒冷时，降雪量增加，发育大规模的冰川，称为冰期；当气候变暖时，冰川大规模消退，叫做间冰期。最近一次冰期大约发生在距今70 000 ~ 15 000 a 间。现在的世界被认为是正处于第四次冰期后的间冰期中。

当李四光发现庐山第四纪冰川遗迹之后，中外地质、地理学家产生了极大的兴趣。赞成者有，反对者也有，正如李先生所说：“然疑者疑之，反对者仍如故也。”。当时在中国工作的、曾看过北欧很多冰川遗迹的瑞典人安特生，认为这些冰川遗迹与北欧不像，而持怀疑态度。德国人费斯曼教授本来持怀疑态度，后来两次去黄山，改变了原来的看法，表示赞同。尽管如此，但持不同看法者仍大有人在。巴博尔对庐山地貌和沉积物的成因，解释为流水作用和坡积、洪积所产生的结果。巴博尔和德日进断定中国无第四纪冰期存在，至少不过有数次干冷与湿热的循环而已。丁骥教授对庐山第四纪冰川也持有异议。否定派主要的论点是：中国所处纬度较低，冰期来临之时，温度虽下降，但还不足以发育成冰川；或认为第四纪之初，中国的气候过于干燥，没有足够的降雪量，也不足以演变为冰流；甚至还有人认为地球两极位置有变化，当时北美及北欧更接近于寒带，所以发育有大陆冰川，而中国更近于赤道，气候未必寒冷，不可能形成冰川。可见当时的反对者未从事实上提出反驳意见，实际工作做得不多，只限于从冰川形成的气候条件上去否定。正如李先生所说：“惜其议驳空疏，多未中要肯。”。所以，他力排众议，仍完成《冰期之庐山》专著。前苏联著名地质学家B.A.奥勃鲁契夫（1951）指出，否认亚洲古代冰川可能性，曾使19世纪末叶和20世纪初的一些研究者，对这一区域的现代地形的发展史作了不正确的解释。李承三、周廷儒、安德生（Anderson）、笛·特拉（De Terra）、魏斯曼（Wissmann）等人都曾论述过中国东部存在古冰川活动。

自从20世纪30年代李四光先生提出庐山和中国东部山地的第四纪冰期理论以来，关于中国东部山地是否发生过第四纪冰川的问题困惑着国内外的地学工作者，并为此展开了旷日持久的争论。

20世纪60年代以来，对我国东部低山丘陵区，更新世期间是否存在古冰川遗迹问题，地质学界存在两种不同的意见：一种意见是建立在理论分析的基础上，认为中国东部丘陵区，具有海拔低、纬度低、湿度低，简称“三低”环境，不具备古冰川发育的条件。换句话说，只有海拔高、纬度高、湿度高的地区，简称“三高”环境才可能存在古冰川活动遗迹。有人列举出冰碛物中的孢粉含有喜暖种群，从而否定古冰川堆积的地貌的地质特征（本书作者认为：冰碛物中的孢粉，应当是间冰期形成的；冰天雪地时期，特别是周围环境被冰川覆盖时并不存在孢粉源，而冰川刻蚀、侵蚀的早期地层，特别是土壤层，本身就含有间冰期时形成的孢粉；冰川从基岩上刻蚀下来的岩石，也就是冰碛物，它不应含有喜暖的孢粉成分；如果找到了喜暖的孢粉，那也是“污染”分子，不能代表就是冰期时期的植物群，所以说，用孢粉分析来否定冰川的存在是非常不可靠的，因为冰期时期的植被主要以苔原植被为主。孢粉分析的最大问题是孢粉“来源”问题无法解决。20世纪60年代，有人就是靠孢粉分析试图否定庐山古冰川遗迹的存在，最终未能如愿）。还有一种意见是建立在大量地质调查的基础上，特别是地矿部门在太行山东麓的山前平原，打了一万多口钻井，发现了大量被埋藏了的古冰川遗迹；在北京西山也找到了大量古冰川堆积地貌和侵蚀地貌。由此可以看出，我国古冰川研究仍处于初始阶段，即“有没有”阶段。随着时间的推移，调查资料的积累，在不远的将来，我国古冰川遗迹的研究将会得到新的发展。