

壶穴差异风化或风蚀作用成因质疑

吕洪波¹⁾, 任晓辉²⁾, 许民²⁾, 欧阳江城²⁾

1) 中国石油大学地球科学系, 山东东营, 257061;

2) 赤峰学院环境与资源管理系, 内蒙古赤峰, 024000

内容提要:过去十年来发表了一系列关于中国东部第四纪冰川地貌的文章, 而关于壶穴成因的争论也通过各种媒介报道出来。笔者等建议壶穴仅仅用于表示快速旋转水流在基岩表面形成的近圆筒形的凹坑, 以口小肚大底平为典型形态特征, 而冰川融水冲蚀形成的壶穴则叫做冰川壶穴。近年来, 有些研究者将中国东部花岗岩山脊上的壶穴与差异风化和风蚀作用联系起来。笔者等分析了风化作用和风蚀作用的特点, 明确指出: 风化作用和风蚀作用并非壶穴形成的原因, 唯一可能的成因是快速的河水或冰川融水的旋转水流。因此, 在中国南方河床上发现的壶穴既可能是河流流水形成的, 也可能是第四纪山谷冰川融水造成的; 而中国北方花岗岩山脊上的壶穴只能是曾经覆盖其上的第四纪冰帽在冰川退缩期之冰川融水形成的。所以, 花岗岩山脊上的壶穴为冰川壶穴(即冰臼), 可以看作第四纪冰帽的标志。根据中国东部壶穴的分布特征推断: 中国东部之北方在第四纪末次冰盛期至少曾经存在着许多冰帽甚至大陆冰川, 而其南部边缘至少已经达到山东蒙山以南。

关键词:壶穴; 差异风化; 风蚀; 冰川融水成因

自从韩同林研究员等报道了河北与内蒙古等地第四纪冰川(韩同林, 郭克毅, 1998; 李邦良等, 1999; 赵国龙等, 2001)以来, 与之对立的成因争论(如: 崔之久等, 1999; 李孟华, 谢小康, 1999; 李洪江等, 2001; 刘尚仁, 2000; 刘尚仁等, 2000; 李德文等, 2003)就从未停止过。其焦点就是: 中国东部海拔低于2500m的地方是否存在第四纪冰川(李吉均等, 2004)。然而, 由于韩同林等将冰臼作为第四纪冰川存在的重要标志(韩同林等, 2000, 2001, 2007; 韩同林, 2004), 关于冰臼或壶穴的成因争论就在所难免了。笔者等阅读相关报道甚至发现诸如“无知”、“伪科学”等偏激字眼(热带地理编辑部, 2002), 争论的激烈程度可见一斑。

近几年, 有多篇研究论文赞同中国东部存在第四纪冰川(徐兴永等, 2004; 吕洪波, 杨超, 2005; 任晓辉, 2005; Sun Hongyan et al., 2005; 田明中等^①; 吕洪波等, 2006; 韩同林等, 2007; 赵志忠等, 2007)。

而否定壶穴为冰川成因的文章也有多篇。

李洪江等(2001)、李德文等(2003)、章雨旭(2005)均认为华北地区壶穴的主要形成原因是差异风化作用, 即花岗岩表面由于偶然因素形成的负

地形(豆大小坑), 因积水, 坑内风化作用远快于不积水的平面区, 从而加速发展, 最终形成口小肚大底平的壶穴。

田明中等^①、Sun Hongyan等(2005)、孙洪艳等(2007)一方面认为该地区存在冰川, 但另一方面他们却认为该区的壶穴是多成因的, 不是冰川存在的证据。

周尚哲(2006)以“锅穴一定是第四纪冰川的标志吗?”为题, 列举了“锅穴”的6种成因。通读全文发现, 周教授的“锅穴”主要是指“pothole”, 包括流水和冰水两种成因, 还包括风化穴、溶蚀坑、风蚀凹槽等地表常见的凹坑, 指出要区分不同成因的“锅穴”, 不能一概均作为冰川存在的证据。

可以看出, 壶穴还存在着定义、理解以及词语使用上的混乱, 这对进一步发现与鉴别第四纪冰川地貌标志是非常不利的。

本文第一作者与章雨旭研究员经过反复讨论, 对近年来中国地学文献中出现的“壶穴”(吕洪波等, 2006)、“锅穴”(周尚哲, 2006)、“冰臼”(韩同林, 2004)、“岩臼”(孙洪艳等, 2007; 高连海, 2007)等进行了分析。一致建议: 以克什克腾世界地质公

注: 本文为中国石油大学引进人才基金资助项目(编号 Y020109)、内蒙古自治区高校教师科研基金资助项目(编号 NJ06022)的成果。

收稿日期: 2007-10-03; 改回日期: 2008-01-07; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 吕洪波, 男, 1957年生。中国石油大学地球科学系教授。长期从事构造地质学、沉积学、第四纪地质学等方面的研究。Email: hongbolu@hpu.edu.cn。

园青山花岗岩山脊上的近圆形凹坑为代表的侵蚀地貌称作“壶穴”,以口小、肚大、底平为特征,对应于英文名词 pothole;而“锅穴”对应于“kettle hole”,指冰积平原上因死冰融化而形成的凹坑。不再制造“岩臼”等新名词。至于基岩表面因溶蚀、风蚀等其他成因造成的形态各异的凹坑,因其形态特征相去甚远,发育位置明显有别,应该称呼其专属名称(如:风化穴 tafoni、风蚀凹槽 alcove 等),不能与壶穴混为一类。对于“壶穴”定义中是否应当包含成因要素,二人未能取得一致(吕洪波,章雨旭,2008)。

本文则着重阐明壶穴差异风化成因说、多成因说的不合理性,进一步论述壶穴的快速旋转水流成因机制,探讨壶穴在第四纪地质研究中的重要意义。

1 国际上的壶穴成因模式讨论

壶穴的成因在国际上已经讨论了一百多年,均认为是快速水流旋转冲刷的结果(Alexander, 1932; Faegri, 1952; Higgins, 1957; Morgan, 1970; Cox, 1975; Gilbert, 2000; Fleeger et al., 2002),而快速水流可以是河流,也可以是冰川融水(<http://www.answers.com>)。挪威现代冰川末端新成的壶穴就是由冰川融水形成的典型实例(图版 I-1; <http://academic.emporia.edu>)。河流形成的壶穴位于急流或瀑布的下方,磨蚀后的河床必然非常光滑(Whipple et al., 2000)。研究发现,适当的沉积物会有利于河床的侵蚀,而过量的沉积物反而覆盖并保护河床(Sklar, and Dietrich, 2004),因此,形成壶穴的地方并非携带沉积物最大的河段。砾石与沙子等也许并非壶穴形成的关键因素,而高速旋转水流才是根本动力。壶穴的形成速度之快也是难以想象的,在现代人工河谷中急流下方几十年内就可形成规模不小的壶穴(Kale et al., 2004);冰川融水从冰盖上下泄速度更快,因此可以在相当短的时间内形成壶穴(Fleeger et al., 2002)。关于壶穴成因的物理实验显示:旋转水流作用于壶穴后,涌入的水流盘旋到壶穴的中心而向上返出(Alexander, 1932),因而能将壶穴中的岩石碎屑物送出壶穴而不至于堆积在壶穴中。因此,高速旋转水流是唯一能解释壶穴基本特征的成因机制。而造成水流旋转的因素非常多,如:科里奥利力造成下泄水流旋转、岩石表面局部阻挡造成水流旋转等。

对于发育于花岗岩高地上的壶穴,绝大多数科学家都认为是冰川融水形成的,因此才称作冰川壶穴(glacial pothole)。如:加拿大安大略省前寒武纪

片麻岩组成的 100m 高的山丘上发育的壶穴形成于冰下水流。当冰盖下的冰川融水受到基岩上的局部突起阻挡时便产生了旋转,于是形成壶穴。冰下融水水流被看作劳伦斯冰盖之下地形侵蚀与改造的动力(Gilbert, 2000; Kunert and Coniglio, 2002)。研究证实,形成壶穴的水流特点是:水体浅而流速大(Zen and Prestegard, 1994)。冰川融水在冰盖下流动就符合这个特点,所以形成冰川壶穴(冰臼)是完全可以理解的。现代技术发明的高压水枪可以切割花岗岩石材(李岳峰等,1999;杨永印等,2003;廖华林等,2006),那么从厚度达几百米甚至上千米的冰盖上夏季融化而下泄的冰川融水的压力足够在较短的时间内对基岩进行强烈的侵蚀作用。发育于花岗岩山脊上的壶穴,一般里面并没有沉积物或鹅卵石等残存,也不可能有河流经过山脊,说明其所需要的高速水流的唯一来源就是冰川融水,而下泄的冰川融水里也不一定挟带很多岩石碎块。

经过上述分析可以看出,壶穴(pothole)就是快速水流在基岩表面形成的近圆形凹坑,而冰臼就是冰川融水形成的冰川壶穴(glacial pothole)。事实上,过去十年来关于冰臼与壶穴的争论中,无论是冰臼论(韩同林等,2000,2001;韩同林,2004),还是壶穴论(崔之久等,1999;刘尚仁,2000;李洪江等,2001;陈华堂等,1999;丘世钧等,2000;朱照宇,2000),讨论都没有偏离上述基本定义。问题是,山脊上的壶穴是否是快速旋转水流形成的!如果是,其水流只能来自上覆冰盖的冰川融水,那么这些壶穴就只能是冰川壶穴(冰臼),就可当作第四纪冰川存在的标志。

2 壶穴的差异风化成因说或多成因说不可取

根据壶穴的定义和前人的研究成果判断,到目前为止令人置信的壶穴成因只有一种,即:快速旋转水流冲蚀形成的。其中因河流漩涡作用在河床上形成的壶穴为河成壶穴,而因冰川融水冲蚀形成的壶穴为冰川壶穴(即:冰臼)。那么,有否其他成因造成的壶穴呢?

近年来有一种趋势,就是试图用非水流成因机制解释花岗岩山脊上的壶穴,甚至不同地点的壶穴采用不同的动力机制,提出所谓的“多成因说”。事实上,多成因说是不科学的,壶穴的成因总有其最主要的因素,其他因素都是无关的或次要的,甚至仅仅起到后期改造和破坏作用。借用的因素太多,提出

所谓的“多成因”说,要么是不明机理的猜测,要么是企图调和不同的学术观点。

笔者等在这里主要阐述差异风化和/或风力作用难以形成壶穴。

2.1 花岗岩是易风化的岩石吗?

孙洪艳博士在刚刚发表的论文中强调“岩臼”(即本文讨论的“壶穴”)的风化成因时用了这样的前提:“花岗岩自身是一种易风化的岩石”(孙洪艳等,2007),笔者等认为这种提法欠妥。

如果说花岗岩是非常容易风化的岩石,那么橄榄岩、辉长岩、玄武岩、安山岩、页岩、泥岩等是否都比花岗岩抗风化能力强呢?当然不是,但为什么在花岗岩表面更容易形成壶穴呢?没有比较就没有鉴别。学过普通地质学的人都知道,矿物抵抗风化的能力可以用鲍温反应序列来描述,最弱的是超基性的橄榄石,最强的是石英,而花岗岩中的长石属于酸性单元,抗风化能力仅次于石英。花岗岩的主要组成就是石英与长石,其抗风化能力比绝大多数岩石都强,因而在地貌上才常常构成山脊,如:安徽的黄山、九华山、山东的泰山、蒙山、崂山、小珠山,大兴安岭附近的青山、阿斯哈图的圆蛋子山、河北祖山等,都是由花岗岩类岩石组成的。为了强调风化作用就将坚硬的花岗岩说成是“易风化”的,这种提法最容易误导非地学专业的广大读者。

2.2 风化作用仅能改造或破坏壶穴,但不能形成壶穴

李洪江等认为,内蒙古、河北花岗岩山脊上的壶穴是由风化和风蚀为主导的多种因素共同作用造成的(李洪江等,2001);李德文等则将上述壶穴归类为风化穴(tafoni)的一种(李德文等,2003)。孙洪艳博士继承了这种多成因说,将花岗岩表面硬币大小的不规则凹坑当作“岩臼”(即壶穴)“五个发育阶段”的萌芽代表(孙洪艳等,2007,见其图版 I-3)。而事实上,花岗岩表面这样的小坑随处可见,不论是南方还是北方,也不论是干旱区还是潮湿区,为什么仅仅在北方的花岗岩山脊上才发展成后来的大型壶穴?有什么证据或理论去论证这些小坑与完整的近圆形壶穴之间的成因联系呢?在讨论青山“岩臼”(即壶穴)的形成特点时,孙博士对南坡和北坡的差异进行了分析,归纳出“冻融作用”、“蓄水”、“日照”、“差异风化”等多种因素,还认为:“初形成的岩臼,臼大水浅”(孙洪艳等,2007)。那么,山脊上的初始蓄水坑是如何形成的(花岗岩山脊应该是最不能蓄水的地方啊)?硬币大小的凹坑是如何蓄水

的?如何变成“臼大水浅”的?生活在中国北方的人应该知道,北方山脊上的壶穴即使是秋季积存一些雨水,到冬天也因干燥而早就干涸了,同样因为干燥,冬天的积雪往往直接升华也无法形成积水,冻融作用在北方干旱区的壶穴中是很难存在的,尽管在土层或深部裂缝中可以存在冻融作用。

孙博士分析青山上的壶穴时提到:山体北坡的“臼”不如南坡的发育得好(孙洪艳等,2007)。笔者曾多次考察克什克腾青山山脊、林西县九佛山山脊、巴林左旗真寂之寺附近山脊、阿斯哈图石林山脊等多处壶穴分布区,不存在上述规律,因为壶穴都发育于山脊上,而非山坡上。

又如:“由于该处盛行西北风,所以风带来的一些物质基本上都沉积于岩臼的东南面”(孙洪艳等,2007)。风积物应该堆积在背风坡——即障碍物的背后(即壶穴内的西北侧),西北风如何造成沉积物堆积于凹坑的东南面?假如我们跳进一个大壶穴中躲避西北风,我们到东南侧去躲避吗?事实上,壶穴中刮进坑中的尘土受到降水的冲刷而沉积成表面水平的沉积层,在壶穴的下方一侧稍厚些。笔者等在青山山脊观测的结果显示:山脊上壶穴中的堆积物都一样,都堆积在下方一侧,并生长杂草等植物,与风向无关(孙洪艳等,2007,见其图版 I-1、6)。

再如:“在岩臼形成后期,臼中的积水在西北风的作用下,再加上地势南倾的原因,使得岩臼的形成向东南方向开口”(孙洪艳等,2007)。实际上,不论壶穴位于哪里,其开口永远指向下方,当冰川融水沿着基岩表面下泄而形成壶穴时,从穴内返出的水自然地向下排泄,侵蚀的开口自然就在下方一侧,与风向无关。有兴趣的读者可以在青山山脊、九佛山山脊、巴林左旗山脊、河北祖山山脊、青岛崂山、大小珠山、蒙山和新泰县青云山山脊观察,毫无例外。

观察所有壶穴,哪怕是相邻穴体已经在下部连通,上部仍然保持完好的近圆形或椭圆形,其口小、肚大、底平的特点说明是纯机械旋转磨蚀的结果,而非风化所致。笔者等提出下面几个问题,看能否用“差异风化”模式来解释清楚:

(1) 风化说提出原始的“蓄水坑”(章雨旭,2005;孙洪艳等,2007)在山脊上如何形成?为何在北方的相对低洼处反而不见壶穴?要知道,低洼处更容易形成积水坑啊!难道低洼处不风化吗?为何广东等地所报道的壶穴都不在山脊上而在山谷中?南方雨水更多啊!

(2) 如果壶穴是差异风化形成的,那么是什么

动力将风化产物清理出去了?

如果说壶穴是风化形成的,壶穴中应该有从全风化到半风化再到未风化构成的风化壳,为什么我们所见到的壶穴底部却没有风化壳,相反却非常干净和新鲜呢(图版 I-2)?要知道,即使是在风化的斜坡上,花岗岩表面的风化壳都是存在的(图版 I-3),是什么动力将壶穴底部风化的残积物清理走了?“风化”说不得不借助于风的吹蚀作用来清理垃圾(孙洪艳等,2007)。但壶穴相对于山坡来说可看作避风港了,因为在大的壶穴中发现堆积了全新世的黄土,有的更生长了杂草甚至桦树(图版 I-4)。这种黄土覆盖现象恰恰说明风不能清理壶穴中的风化产物。

(3) 南方现代河床上的壶穴能用风化解释吗?那里千百年来一直覆盖着流动的水啊!

如果说南方河谷中的壶穴是快速水流侵蚀形成的,为什么北方花岗岩山脊上的就不是水流侵蚀的呢?就因为它们今天所处的位置没有河流吗?同样的形态,同样的基岩性质,为何要用不同的机制解释?

(4) 风化作用总是沿着节理缝最强,因此被几组节理切割的花岗岩块往往棱角浑圆而构成球状风化外貌。也就是说,风化作用总是将岩石的棱角圆化。然而,壶穴与节理相交的地方并没有显示出风化作用的上述特点。如:在小珠山上的壶穴雏形显示的平底上有几条节理缝穿过,但与壶穴的形成无关(图版 I-5)。在蒙山山崖顶部保留的冲刷槽旁边,可以看见清晰的节理,但冲刷构造并不沿着节理发育,说明其形成与风化无关(图版 I-10)。此外,壶穴口缘的尖锐外凸形状(图版 I-6)为何没有被风化作用而圆化呢?

需要注意的是,差异风化的物质基础是岩石的非均一性,而北方山脊上的壶穴内至今并未发现不同性质的岩石包体,即使是偶尔存在的细小岩脉也与壶穴的形状无关。笔者等所考察过的各种壶穴内外附近的岩石之风化程度基本一致,这也说明壶穴的形成与风化无关。风化作用确实不断改造着壶穴(如:发育于青岛浮山上的壶穴由于受到现代强烈的风化作用,沿着节理缝已经风化破坏,图版 I-7),但却不是壶穴形成的原因。

2.3 风的吹蚀是沿着地表横向作用的,无法形成壶穴

崔之久教授认为巴林左旗七锅山上的壶穴是风蚀的结果(崔之久等,1999);刘尚仁在强调广东等

地花岗岩山谷中的壶穴为河流成因的同时也赞成崔之久教授的风蚀说(刘尚仁,2000)。笔者等认为:风蚀作用不可能形成壶穴。现作分析如下:

首先,风的作用并非由高空垂直向下吹蚀,而是沿着地面横向吹蚀的。由于在近地表处携带细砾和砂子等,风的吹蚀作用在地面以上几十厘米高度以内最强,而且是横向吹蚀,因此才容易形成风蚀蘑菇等特殊地貌形态,才能造成强风沙区电杆根部的细颈化现象。此外,风力作用总是造成障碍物的迎风坡侵蚀,背风坡堆积。笔者等考察赤峰北部勃隆克沙地地貌区发现:强烈的西风作用于突起的花岗岩山脊上,在迎风面上形成密集而定向的蜂窝状凹坑(图版 I-8),而在背风坡侧则形成连片的沙丘。碰巧山脊上也有壶穴,但西风却对其造成了破坏并给穴内充填了沙土,说明风与壶穴的形成无关。

从作用力的方向上分析,横向吹蚀的风如何在山脊上侵蚀出向下凹进的近圆形壶穴呢?

壶穴内有黄土等沉积物恰恰说明:壶穴不是风蚀的产物,而恰恰是风积物的场所。那么,在壶穴接受黄土沉积之前,是什么力量将其掘深的呢?显然不是风。

3 快速旋转水流是壶穴的唯一成因

从近十年来的报道和笔者等考察的结果可以归纳出壶穴的分布规律:在中国南方主要见于基岩河床上,而在北方则主要见于花岗岩山脊上。如:广东地区的壶穴发育于花岗岩河床上(朱照宇,2000;刘尚仁,2000;韩同林,2004;陈华堂等,1999;杨超群,2001),而山东的壶穴(吕洪波,杨超,2005;Lu Hongbo et al., 2007)、河北的壶穴(韩同林,郭克毅,1998)、山西的壶穴(孟宪刚等,2004)、内蒙古赤峰地区的壶穴(崔之久等,1999;李洪江等,2001;李德文等,2003;章雨旭,2005;吕洪波等,2006;孙洪艳等,2007)则毫无例外地发育于花岗岩山脊上。壶穴形态的四大特点(近圆、口小、肚大、底平)以及主要发育于坚硬的花岗岩表面这些特征难以用风化和风蚀等成因进行解释,但却可以用快速旋转水流进行完美的论述。

对于南方河床上的壶穴,其形成动力可以有两种:一是河流瀑布或急流下方平坦地段河流漩涡造成的,另一个就是第四纪山谷冰川因冰川融水下泄而对河床进行旋转冲蚀造成的。这两种动力形成的壶穴在外形上应该有区别,值得进一步研究,但却都是快速水流形成的。对于已经报道的南方河谷中的

壶穴, 尽管不少同行并不认同韩同林的冰臼说, 但前人的研究表明, 除存在河流成因的可能外, 不排除南方曾经发育过第四纪山谷冰川的可能(杨超群, 2001)。

对于北方花岗岩山脊上形成的壶穴, 由于山脊上不存在河流流水作用, 其唯一的动力就是第四纪冰川融水, 这就必然让人联想到山脊上方覆盖着冰帽或冰盖。那么, 为何中国北方的壶穴都见于花岗岩山脊上而不发育于斜坡或平坦的山谷中呢? 笔者等的解释如下:

首先, 冰帽或冰盖在山脊上方因重力作用而向两侧下方蠕动, 最容易产生冰裂隙, 冰体虽然不断运动, 但冰裂隙却始终在山脊上方出现, 这就为冰川退缩期夏季的冰川融水提供了重要的排泄通道。而山脊提供了相对平坦的局部地形, 迫使下泄的冰川融水到达基岩表面后不得不向四周扩散, 使得从冰裂隙下泄过程中因科里奥利力等影响而形成的复杂漩涡流直接冲蚀岩石表面。在山脊处扩散的水流随即向下方的山坡排泄, 这就使得山脊一直处于冰川融水的直接冲蚀之下而慢慢形成规模不等的壶穴。

高压水射流实验显示, 高压水流垂直于岩石表面时的冲蚀作用并非最大, 而是倾斜了 $12^{\circ} \sim 14^{\circ}$ (即: 与岩石表面夹角为 $76^{\circ} \sim 78^{\circ}$, 笔者注) 时对岩石的冲蚀作用最强(杨永印, 李根生, 2003; 廖华林, 李根生, 2006)。这一实验结果可以很好地解释华北东部花岗岩山脊上的壶穴口小、肚大、底平的形态特点。冰川融水下泄而作用到岩石表面上时, 向四周稍微偏斜的水流对岩石的侵蚀作用最强, 因而造成壶穴内壁随着深度增加而向周围扩展。而且, 壶穴一旦形成, 其穴内的水流必然因惯性而保持涡流状态, 而积水从中心向上返出(Alexander, 1932), 然后才从壶穴的低侧溢出, 这就更加速了底部边缘岩石的冲蚀作用。此外, 花岗岩中的剥离面理(exfoliation)在山脊上都基本上处于水平状态。笔者等观察发现, 发育壶穴的山脊上, 花岗岩内部都发育了与剥离面理平行的一系列微小裂隙, 将石英颗粒都切穿了(图版 I-9), 这就为冲蚀提供了结构条件, 是造成壶穴底部平坦的重要因素。目前笔者等所观察过的壶穴, 底部平面都与剥离面理平行。

倾斜明显的山坡不利于旋转水流的形成, 从冰裂隙下泄的冰川融水快速下降而遇到倾斜的岩石表面时, 只能转向下方冲刷, 在这种情况下也只能形成冲刷凹槽(图版 I-10), 而不能形成壶穴。

而同样处于第四纪冰川退缩期冰层覆盖之下的

平坦低洼地区, 因地势平坦且大面积接受冰川融水, 必然充盈着融化的水, 即使有下泄的融水也无法直接作用于基岩表面, 因此低洼处反而无法形成壶穴。南方河谷地形却明显不一样, 那是个泄水通道, 即使是冰川融水流到冰舌下面的河床之上, 还是能够轻易地向河流下方流失, 使河床保持浅水条件, 所以南方河谷能形成壶穴。

壶穴在中国东部的这种分布规律显然揭示了一个重要的信息: 中国北方曾经发育过第四纪大陆冰川, 这个大陆冰川的分布特点尚需要进一步研究; 而南方当时只能存在山谷冰川。

4 现存的冰川壶穴(冰臼)应该是末次冰期退缩时的产物

显然, 现在保存在花岗岩山脊上的冰川壶穴(冰臼)只能是末次冰盛期(LGM: last glacial maximum)晚期的产物。即使是早期形成的冰臼, 在后来的冰川运动过程中也多被破坏, 只有末次冰期退缩阶段形成的冰臼才得以保存下来。冰臼形成的时间需要通过宇宙成因核素等方法测量其暴露时间, 或利用相关标志判别冰川退缩的大致年代。如: 利用胶州湾里最古老的沉积物大约两万年左右而判别, 胶州湾是在冰川退缩期受到大量冰川剥蚀而形成的峡湾(Lü Hongbo et al., 2007), 这也同时说明胶州湾附近崂山、大小珠山山脊上的冰臼也应该是这个时期形成的。

中国东部确实发育过第四纪大陆冰川, 这个大陆冰川的南部边缘至少已经到达山东南部, 依据就是花岗岩山脊上的冰川壶穴的分布(吕洪波等, 2006)。第四纪末次冰盛期(LGM)中国东部大陆冰川到底向南延伸到什么地方? 值得进一步研究。

5 结论

(1) 基岩表面的凹坑并非都是壶穴, 只有快速旋转水流侵蚀而形成的近圆形或椭圆形的凹坑才是壶穴, 应该将不同成因形成的凹坑严格地区分开来。

(2) 壶穴的多成因说不可取。风化作用和风蚀作用不能形成壶穴, 只能改造或破坏壶穴。

(3) 分布于南方河床上的壶穴可能是河流侵蚀形成的, 也可能是山谷冰川融水冲蚀形成的, 需要进一步研究; 华北东部花岗岩山脊上的壶穴只能由第四纪上覆冰盖的冰川融水下泄冲蚀而成, 可以称为冰臼或冰川壶穴, 是末次冰盛期冰川退缩的产物, 可以作为第四纪大陆冰川发育的标志。

谢语:笔者等非常钦佩《热带地理》杂志曾经为第四纪冰川研究提供了热烈讨论的平台,更感谢最近几年来《地质论评》杂志为不同学术观点的研究者提供了争鸣的园地。笔者等相信,这种讨论或争鸣一定会继续下去,直到地学界在中国东部第四纪冰川有无这个根本问题上达成共识。本文在讨论中涉及到不同观点的作者,恐有用语不恭,在此提前致歉并欢迎批评指正。

注 释 / Note

① 田明中,孙洪艳,武法东,孙继民,顾国君. 2005. 克什克腾世界地质公园地质遗迹的科学价值. 第六届世界华人地质科学研究讨论会暨中国地质学会二零零五年学术年会论文摘要, 211~215.

参 考 文 献 / References

陈华堂,丘世钧,黄山,范小平. 1999. 揭西、丰顺“冰臼群”成因商榷. 热带地理, 19(4): 376~380.

崔之久,李洪江,南凌,李德文. 1999. 内蒙、河北巨型壶穴与赤峰风道的发现. 科学通报, 44(13): 1429~1434.

地质矿产部地质辞典办公室. 1983. 地质辞典(一)普通地质构造地质分册(上册). 北京:地质出版社.

高连海. 2007. 探访神奇的克什克腾. 大自然, (5): 42~46.

韩同林. 2004. 发现冰臼. 北京:华夏出版社, 190页.

韩同林,郭克毅. 1998. 河北及内蒙古中低山区罕见的冰臼群. 中国地质, (6): 42~45页.

韩同林,劳雄,郭克毅. 2000. 关于南国冰臼群成因的商榷. 热带地理, 20(1): 72~80.

韩同林,劳雄,郭克毅. 2001. 关于南国冰臼群成因的商榷之二. 热带地理, 21(2): 189~194.

韩同林,陈尚平,杜又常,魏建钢,赵南兴,吴焕九. 2007. 浙江上虞发现罕见第四纪冰臼群地貌及冰川遗迹. 地质论评, 53(2): 文后1~4.

李邦良,李志中,韩同林. 1999. 内蒙古东部大陆冰川地貌卫星图像解释. 地质力学学报, 5(3): 89~95.

李德文,崔之久,李洪江,南凌. 2003. 华北北部花岗岩风化穴形成机制与环境意义. 南京大学学报(自然科学), 39(1): 120~128.

李洪江,崔之久,赵亮. 2001. 内蒙、河北山区壶穴的成因探讨——兼论壶穴的成因分类. 地理学报, 56(2): 223~231.

李吉均,舒强,周尚哲,赵志军,张建明. 2004. 中国第四纪冰川研究的回顾与展望. 冰川冻土, 26(3): 235~243.

李孟华,谢小康. 1999. “冰臼”与“壶穴”之争. 热带地理, 19(4): 381~384.

李岳峰,宋敬伟. 1999. 超高压水射流技术在石材切割中的应用. 石材, (3): 13~15.

廖华林,李根生. 2006. 淹没条件下超高压水射流冲蚀切割破岩实验研究. 天然气工业, 26(5): 61~63.

刘尚仁. 2000. 关于冰臼形成与保存机理认识上的几个误区. 热带地理, 20(2): 156~161.

刘尚仁,覃朝峰,彭华. 2000. 关于广东有无冰川发育条件的讨论. 地理科学, 20(4): 375~380.

吕洪波,任晓辉,杨超. 2006. 赤峰等地第四纪大陆冰川的地貌证据. 地质论评, 52(3): 379~385.

吕洪波,杨超. 2005. 山东新泰青云山发现第四纪冰川遗迹. 地质论评, 51(6): 608.

吕洪波,章雨旭. 2008. 壶穴、锅穴、冰臼、岩臼等术语的辨析与使用建议. 地质通报, 27(6).

孟宪刚,朱大岗,邵兆刚,余佳,韩建恩,孟庆伟. 2004. 山西北段第四纪冰川遗迹的发现及意义. 地质力学学报, 10(4): 327~336.

丘世钧,陈华堂,黄山,范小平. 2000. 与“冰臼论”再商榷. 热带地理, 20(3): 243~246.

热带地理编辑部. 2002. 专家访谈:中国科学院院士施雅风谈“冰臼”与“壶穴”. 热带地理, 22(1): 1~2.

任晓辉. 2005. 克什克腾青山冰臼群自然保护区第四纪冰川地貌识别. 赤峰学院学报, (2): 9.

孙洪艳,田明中,武法东. 2007. 克什克腾世界地质公园青山花岗岩臼的特征及成因研究. 地质论评, 53(4): 486~490.

徐兴永,石学法,于洪军,李萍. 2004. 崂山顶、洞、沟、坡、麓、滩、岬一带巨砾成因研究. 海洋科学, 28(6): 10~13.

杨超群. 2001. 冰臼与壶穴之争述评. 热带地理, 21(1): 86~93.

杨永印,李根生. 2003. 超高压水射流破岩及切割实验研究. 石油大学学报(自然科学版), 27(1): 36~37, 48.

章雨旭. 2005. “冰臼”成因争鸣——以克什克腾旗青山岩臼群为例. 地质论评, 51(6): 680, 712.

赵国龙,朱洪森,李泊洋,王友,朱慧忠. 2001. 论内蒙古第四纪冰川和冰臼群的成因. 中国区域地质, 20(2): 200~205.

赵志中,钱方,何培元,凌小惠,李名则,孙继民,郝治,田明中. 2007. 内蒙古克什克腾旗花岗岩林的形成及成因. 地质论评, 53(增刊): 98~103.

周尚哲. 2006. 锅穴一定是第四纪冰川的标志吗? 第四纪研究, 26(1): 117~125.

朱照宇. 2000. 广东揭西河谷地貌与风化层特征初步观察. 热带地理, 20(4): 331~336.

Alexander H S. 1932. Pothole erosion. Journal of Geology, 40(4): 305~337.

Cox D E. 1975. On the interpretation of potholes. Creation Research Society Quarterly, 12(1): 25~31.

Faegri K. 1952. On the origin of pot-holes. Journal of Glaciology, 11(2): 24~25.

Fleeger G M, Braun D D, Inners J D. 2002. Plunge into the past or go with the flow: multiple hypotheses for the origin of the Archbald Pothole, Lackawanna County, Pennsylvania. Geological Society of America Abstracts with Programs, 34(1): 27.

Gary M, McAfee R Jr, Wolf C L. 1972. Glossary of Geology. American Geological Institute, Washington, 1~805.

Gilbert R. 2000. The Devil Lake pothole (Ontario): evidence of subglacial fluvial processes. Geographie Physique et Quaternaire, 54(2): 245~250.

Higgins C G. 1957. Origin of potholes in glaciated regions. Journal of Glaciology, 21(3): 11~12.

<http://academic.emporia.edu/aberjame/ice/lec03/f3m.jpg> 现代冰川末端暴露出壶穴.

<http://www.answers.com/pothole?cat=technology> 壶穴的定义.

Kale V S, Joshi V U. 2004. Evidence of formation of potholes in bedrock on human scale: Indrayani river, Pune district, Maharashtra. Current Science, 86(5): 723~726.

Kunert M, Coniglio M. 2002. Origin of vertical shafts in bedrock along the Eramosa River valley near Guelph, southern Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences, 39(1): 43~52.

Lü Hongbo, Yan Shiyong, Zhang Yue. 2007. Quaternary glacio-erosional landforms in Laoshan Mountain and their constraints on the origin of Jiaozhou Bay, Qingdao, east of China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 25(2): 139~148.

- Morgan A V. 1970. Late Weichselian potholes near Wolverhampton, England. *Journal of Glaciology*, 55(9): 125 ~ 133.
- Sklar L S, Dietrich W E. 2004. A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load. *Water Resource Research*, Volume 40, W06301: 1 ~ 21.
- Sun Hongyan, Tian Mingzhong, Wu Fadong, Zhang Jianping. 2005. Discovery and significance of Quaternary glacial vestiges in the Hexigten area of the southern Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 79 (4): 564 ~ 569.
- Whipple K X, Hancock G S, Anderson R S. 2000. River incision into bedrock: mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geological Society of America Bulletin*, 112 (3): 490 ~ 503.
- Zen E, Prestegard K L. 1994. Possible hydraulic significance of two kinds of potholes: examples from the paleo-Potomac River. *Geology*, 22 (1): 47 ~ 50.

图版说明 / Explanation of Photos

(除注明者外,均为吕洪波摄。)

1. 挪威现代冰川末端由冰川融水形成的典型壶穴(据: [http://](http://academic.emporia.edu/aberjame/ice/lec03/f3m.jpg)

- academic.emporia.edu/aberjame/ice/lec03/f3m.jpg)。
2. 山东新泰青云山混合岩化花岗岩山脊上的冰川壶穴,穴内岩石新鲜干净,无风化产物。(据:吕洪波,杨超,2005)。
3. 山东新泰西西周水库旁远古宙花岗岩风化壳:全风化残积物覆盖在半风化和新鲜岩石上方。
4. 赤峰北部青山花岗岩山脊上直径近 10 m 的壶穴内已经生长了草和桦树。
5. 山东青岛小珠山花岗岩表面浅壶穴平坦底部的节理缝并未显出风化特点。
6. 赤峰巴林左旗平顶山上冰川壶穴的边缘棱角鲜明,未受风化影响。壶穴显示出口小、肚大、底平和开口在下方一侧的特点,壶穴及出水口内沉积物和积水使得杂草生长。
7. 青岛浮山花岗岩山脊上的壶穴被现代风化沿着节理缝改造。
8. 赤峰北部勃隆克沙地花岗岩迎风坡被风蚀,表面定向凹坑成群分布。
9. 赤峰北部青山山坡上的剥离面显示出一系列平行的微裂隙。
10. 山东蒙山花岗岩山脊旁边山崖顶部斜面上的冲刷槽与节理缝无关。

An Argument on the Genesis of Potholes Formed by Differential Weathering or Wind Deflation

LU Hongbo¹⁾, REN Xiaohui²⁾, XU Min²⁾, OUYANG Jiangcheng²⁾

1) *Department of Earth Sciences, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061;*

2) *Department of Environment and Resources, Chifeng College, Chifeng, Inner Mongolia, 024000*

Abstract: In the past decade, a lot of papers related to the landform records of Quaternary glaciation in the east of China have been published and the controversies on the origin of potholes have been reported by many kinds of media. However, different authors used different names to describe the same kind of erosion landforms —— potholes. Moreover, some researchers used the term pothole to describe different erosion landforms. This is not good for scholars to identify potholes and then reveal the past geological events. The authors of this paper analyzed the definition of pothole, and suggested that the term “pothole” can only be used to describe a smooth, roughly circular, bowl-shaped or cylindrical hollow formed on the surface of bedrocks by fast whirling stream current or meltwater and that the pothole on the surface of bedrock with meltwater origin be called glacial pothole.

Recently, some researchers related potholes found on the granite ridges in the east of China to differential weathering or wind erosion. The authors of this paper analyzed the characteristics of weathering and wind deflation, pointing that weathering and deflation are not the origins of potholes. The only possible origins of potholes are fast river currents or meltwater currents. Therefore, the potholes found on the bottoms of bedrock in the river channels in the south of China should have been formed by river currents or by the meltwater from the Quaternary valley glaciers, while the potholes found on the granite ridges in the north of China can only be formed by the meltwater from the Quaternary ice caps during the later stage of last glacial maximum. Thus, the potholes found in the granite ridges can be treated as the records of Quaternary ice caps.

According to the distribution of potholes in the east of China, many ice caps or even continental glaciers should have been existed in the north of east China during the late time of LGM, and the south margin of the glaciers should have extended at least to the south of Mount Mengshan, Shandong Province.

Key words: pothole; differential weathering; wind deflation; meltwater origin

