

山脊壶穴不能作为中国东部第四纪冰川的证据

章雨旭^{1,2}, 刘恋²

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 中国地质学会, 北京 100037

摘要 中国东部有无第四纪冰川是中国地质、地理学界争论了几十年的具有重大影响的问题。山脊壶穴被一些文献作为中国东部存在第四纪冰川的重要证据。笔者认为,山脊是一直处于剥蚀中的,所以山脊壶穴不可能是古代的遗物,应当是近、现代的产物。而山脊壶穴的冰成说不能很好地解释其地质特征,冰成机制也难以令人信服。山脊壶穴是差异风化形成的,即原始的小坑或浅坑因为积存雨水,花岗岩中的长石分解加速,相对于无水的裸脊,风化速度显著加快,从而加深、扩大。在包头以北发现很浅的壶穴(4—5cm深)即已具有口小肚大底平的形态;可以看到有许多壶穴由于位于陡崖边部,因壶壁被剥蚀穿通,不能再存水,从而不再加深;在山东新泰更有一壶穴具有两阶段演化的特点;这些现象表明壶穴是逐渐扩大加深的渐变产物。观察最近揭示的北京延庆白龙潭巨型壶穴,恰位于河流拐弯且变狭窄处,为洪水时旋涡形成。所以,中国东部的这些壶穴,无论是山脊壶穴还是河谷壶穴,都不能作为古冰川的充分证据或必要证据。

关键词 壶穴;冰川;第四纪

中图分类号 P931,P931.4,P512

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.33.010

Potholes on Hilltops is Not the Evidence for Quaternary Glacier in Eastern China

ZHANG Yuxu^{1,2}, LIU Lian²

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Geological Society of China, Beijing 100037, China

Abstract Whether or not there was Quaternary glacier in eastern China is a question with a significant impact, which has been debated for decades by the geological and geographical scholars of China. Potholes were considered as the important evidence of Quaternary glacier in eastern China in some papers. However, it is considered that the hilltop is always in the environment of denudation, therefore the potholes on hilltops could not be the ancient stuff, while they should be the result of modern and contemporary processes. And the ice-induced theory could not explain the geological characteristics of the potholes on hilltops, and the formation mechanism is also hard to believe. It is considered that the potholes on hilltops are formed by differential weathering. The original small and/or shallow pit accumulated rainwater, then the feldspars in the granite began to accelerate decomposing, comparing with the anhydrous naked ridge, the weathering rate was significantly quick, leading the pit deepened and enlarged. It is found that a shallow pit (4 to 5 cm deep) in western Inner Mongolia has had typical characteristics of potholes, i.e. small mouth, large belly, and flat bottom; many of the potholes located on the margin of the cliffs were no longer deepened and enlarged, because the pot walls were eroded through and could no longer contain water; and in Xintai, Shandong Province, the characteristics of a pothole on top of the Qingyun Mount show that it has experienced two stages evolution. These phenomena show that the potholes on hilltops are the products of gradually enlarged and deepened. The huge pothole in the Bailongtan (White Dragon pool) in Yanqing, Beijing was observed, the pothole is just located in the turning and changing narrow zone of the river, and it is considered that was formed by the flood swirl. Therefore, the potholes, either on hilltops or in valleys,

收稿日期:2011-06-11;修回日期:2011-11-10

作者简介:章雨旭,研究员,研究方向为区域地质学和矿床学,电子信箱:zhangyuxugeo@163.com

could not be used as the evidence of paleo-glacier.

Keywords pothole; glacier; Quaternary

0 引言

中国东部有无第四纪冰川一直是地质界争论的话题。自李四光于 1922 年在中国地质学会第三次会员大会上以“中国第四纪冰川作用的证据”为题,介绍他在太行山麓和山西大同盆地目睹有条痕石块的杂乱堆积,认为华北与欧美同样发生过第四纪冰川^[1]以来,这个问题在中国地质、地理学界已争论了近 90 年^[1-4]。自从韩同林等^[5]报道了河北与内蒙古等地的“冰臼”以来,虽有许多文章反对其冰川成因,但仍被许多文献作为第四纪冰川的证据^[6-18]。特别是,正如施雅风^[2]所说,由于有不少旅游部门欢迎“冰臼论”,认为有利招揽游客,加上媒体偏爱猎奇,这种花岗岩体山脊上的凹坑作为古冰川遗迹,频频出现在多种大众媒体上,“影响读者盲目相信过于夸大的第四纪冰川分布范围,并导致旅游部门广泛布置第四纪冰川景点,对社会舆论和旅游文化产生了不良误导作用”。“冰臼”在中文期刊报纸上还有壶穴^[19]、A 型风化穴^[20]、岩臼^[21]、锅穴^[22]、坑穴^[23]等名称,章雨旭^[24]探讨了这些名词的来源,并建议统一使用壶穴,同时去掉壶穴原始定义中关于其因为冲击水流形成的限定,若有必要,可加成因前缀。若认为是冰成,可强调为“冰川壶穴”;若认为是差异风化形成,可称为“差异风化壶穴”。

李洪江等^[19]、周尚哲^[22]分别对壶穴和锅穴(文献[19]用的英文是 pot,文献[22]是 pothole,即本文之壶穴)进行了成因分类,但从分类表上看,有些凹坑似不应归于 pothole,如石灰岩上的溶蚀坑、海岸浪蚀坑等,因为它们已经远离了 pothole 的定义^[25]。

本文所述山脊壶穴即是指类似于克什克腾世界地质公园青山山脊上的,以口小肚大底平为特征、平面近圆形,深十余厘米至几米,直径几十厘米至十几米,发育于花岗岩体顶面的凹坑。本文的壶穴仅取 Gary 等一书^[26]中 pothole 的形态特征,可以有不同的成因^[24]。

关于山脊壶穴的成因,西方研究主要认为是由冰下或冰旁湍流形成,作为第四纪冰川的遗迹。中国学者有多种不同认识。本文对中国北方花岗岩山脊上的壶穴冰成说进行详细批驳,对差异风化说进行系统论证,并略述延庆山区大庄科河谷中的白龙潭巨型壶穴为洪水旋涡成因。

1 山脊壶穴的成因

关于山脊壶穴及冰川区壶穴的成因,在西欧和北美,人们最早普遍认可“磨坊假说”(Moulin hypothesis),即认为山脊壶穴及冰川区壶穴是冰川融水沿着冰体内的缝或洞(因冰水下泄声若磨坊,故名 Moulin。Moulin 现在已可特指冰体内向

下排泄冰川融水的通道)向下冲蚀冰下基岩而成。20 世纪 30 年代,人们开始怀疑这一假说。20 世纪 50 年代初,大多数学者抛弃了“磨坊假说”,认为是地表(sub-aerial)或冰下涡流形成。但仍有一些“磨坊假说”的拥护者,反对涡流说^[26]。西方发现的山脊壶穴及冰川区的壶穴均是作为冰川的证据。如英格兰 Wolverhampton 西边爱尔兰海冰碛下山脊边(52°34'03"N, 2°13'04"W)砂岩上的壶穴,被认为是爱尔兰海冰席之下或近旁的溪流形成,接着被冰席带来的砂砾堵塞,后来被冰碛物覆盖^[27]。美国宾夕法尼亚州的东北部 Archbald 壶穴州立公园的壶穴,深度 38ft(1ft=30.48cm),最大处长径 42ft、短径 24ft,位于山坡上的一个小沟谷中,壶穴壁的上部为宾夕法尼亚系 Llewellyn 组砂岩,中一下部为灰色页岩,底部为黑色无烟煤^[28-29]。PA State Agencies^[29]所附的形成模式图是磨坊假说,而 Fleeger 等^[26]则说明其形成有两种认识,即磨坊假说和冰下流水剥蚀假说,并指出了各自的有利证据。马萨诸塞州 Shelburne Falls 壶穴(从同时上传的照片看,位于河谷中的条带状混合岩上),直径达 39ft,号称世界上“最大”的壶穴(但现在看来,小于北京延庆大庄科的山谷壶穴),也被认为是冰川壶穴(glacial pothole)^[30]。加拿大安大略省南东前寒武纪地盾的副片麻岩上,在近山顶处有一个 1.93m 深,最大直径 1.3m 的壶穴,海拔 173m,被认为是由冰下水流形成^[31]。

关于山脊壶穴的成因,在中国,韩同林仍坚持“磨坊假说”,且认为是 200—300 万年前形成的。吕洪波等^[13-14]未明确阐述壶穴的形成过程,但他们认为是冰川融水沿着冰裂隙下泄侵蚀的证据之一,且是末次冰盛期的产物。而崔之久等^[32]认为形成山脊壶穴的地质作用以风蚀为主,李洪江等^[19]指出山脊壶穴是风化风蚀穴,吴忱^[33]认为现位于山脊的壶穴是古夷平面上的流水形成,并非与冰盖有关。

本文认为,差异风化说可以很好地解释山脊壶穴的分布和地质特征。

李德文等^[20]最早提出并论证中国东部壶穴(他们称其为 A 型风化穴或锅穴)为差异风化成因,认为是大气降水在负地形中的存留导致负地形中的风化加速,进而加深扩大,形成壶穴。但李德文等^[20]解释可能是第四纪冰期冰缘环境的冻融作用导致穴内风化加速,原始负地形可能只是继承了古夷平面上的负地形,未能击中要害。

田明中等^[34]指出岩臼是由于岩石的差异风化以及风、水作用等综合物理和化学作用而形成的,但未作详细论证(岩臼即本文之壶穴)。章雨旭^[25]简要论证了壶穴为差异风化形成。孙洪艳等^[21]则进一步强调了风化的重要性,但仍认为是多种作用的联合结果。然而,吕洪波等^[10-15]和任晓辉等^[17]坚信北

方若干山脊上的壶穴是冰水冲刷成因,而南方河谷的壶穴可能是河流,也可能是山谷冰川的遗物,并对差异风化说提出质疑,指出“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”^[13,36]。

施雅风^[2]指出,“章雨旭^[39]论点完全正确,但没有深入联系花岗岩岩性特征也没有形态描述”。并提出“花岗岩类地区臼状地形是近现代负球状风化与风、水等协力作用的结果”。尽管韩同林^[37]和吕洪波等^[13]对施雅风^[2]提出了反驳,但施雅风^[1,3]接着又明确指出李四光的庐山冰川是对泥石流的误读,并再次否定中国东部中低山区存在第四纪冰川的可能性。

最近,北京延庆大庄科白龙潭被揭示为一巨型壶穴,章雨旭与韩同林、吕洪波等一起进行了考查和讨论。韩同林和吕洪波认为是冰川壶穴,而章雨旭认为是河谷洪水旋涡冲刷形成的壶穴^[14]。

至今,章雨旭先后实地考察过克什克腾世界地质公园青山山脊壶穴群和山东新泰青山山脊壶穴群,在内蒙古西部达尔

罕茂明安联合旗见到了初具壶穴形态的浅坑(图 1(a)),发现山脊壶穴是渐变形成的,它们可以处于幼年、青年、壮年和死亡等不同阶段(图 1(a)—(h)),认为:(1) 所见山脊壶穴均是差异风化的产物;(2) 延庆大庄科山谷壶穴是河流产物;(3) 基于一般原理,南方河床的下蚀速度更快,即使是末次冰盛期的产物,至今也已万年有余,绝无可能完好地保存到今。

况且,广东一带的河谷壶穴冰川形成的可能性^[38-40]已经被多人详细地批驳,指出它们均是河水成因^[41-44]。陈华堂等^[41]指出:(1)广东第四纪时期地处低纬度区,且海拔不高;(2)孢粉、子遗植物及动物化石为热带亚热带组合;(3)即使有过冰川壶穴,由于河水的侵蚀很快,也不可能保存至今。刘尚仁等^[43]也指出,2Ma 以来,广东山区水系下蚀约 200m,且广东河谷没有被冰碛物覆盖过,因此即使有古冰川壶穴,也早已被风化剥蚀掉了。

所以,尽管古冰川可能形成冰川壶穴(即假定北美和西欧的报道均是正确的),但中国东部的这些山脊壶穴也不能

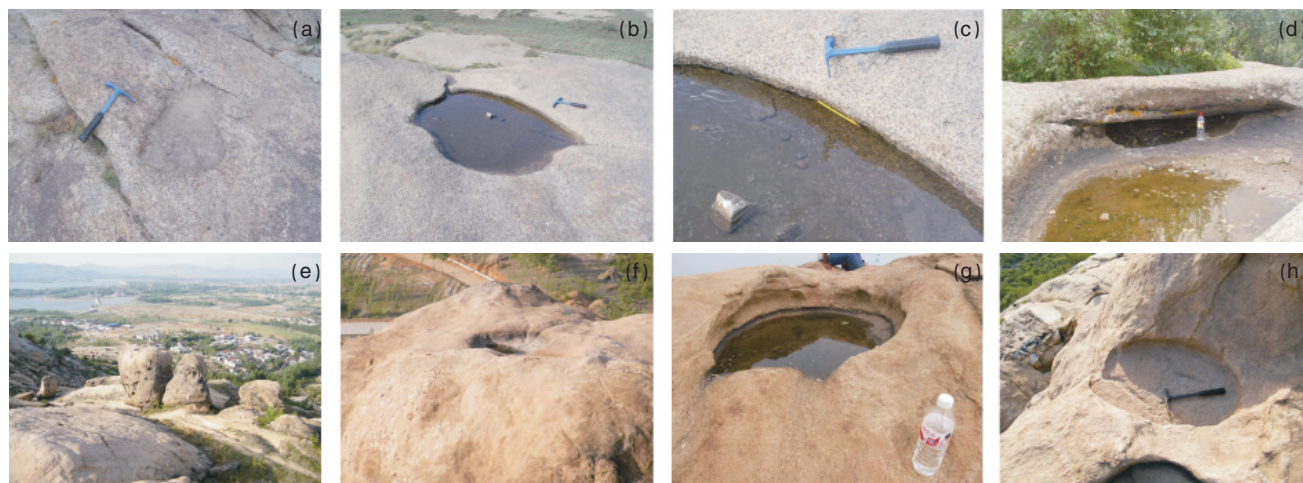


图 1 中国东部山顶壶穴的类型及特征

Fig. 1 Types and characteristics of the potholes on hilltops in eastern China

注:(a)幼年壶穴,花岗岩表面的一个积水小坑,初具平底特征;内蒙古达尔罕茂明安联合旗北西海西期花岗岩(41°43.075'N,110°22.123'E,深度(1388±9.7)m)。(b),(c)青年壶穴,平缓的粗粒花岗岩顶面,一约 2m²的椭圆形平底坑,虽然只有 4—5cm 深,但已显出口小肚大的特点,见(c)中铅笔处,(c)为(b)之局部;内蒙古达尔罕茂明安联合旗白灵庙—固阳公路与白灵庙—白云鄂博公路分叉处南西,公路北西侧(41°40.463'N,110°10.003'E,深度(1576±10)m)。(d)壮年壶穴,两相邻壶穴底部已风化沟通;克什克腾世界地质公园青山山顶。(e),(f)石蛋上的壶穴,表明壶穴不可能太古老;(e)两并列石蛋;(f)左侧石蛋上的壶穴;山东新泰青山山东侧山坡。(g)两阶段壶穴,在近底部有一圈凸出的脊,左边和右边各有一缺口;推测原来均是壶的壁,是封闭的,当风化到这个脊的水平时,因风化缺口打开了(可能是右边这一缺口,因为现在它与脊的水平差不多,但也不能排除是左边),壶中不再能存满水,故该脊线及其以上的壶肚不能再扩大;现在的脊是第二期的壶口,由于左边的缺口现在也已打开了,该壶穴将不再能够存水,已死亡。山东新泰青山山,吕洪波摄。(h)夭折的壶穴,由于左侧为陡崖,而风化作用将壶壁破坏,现在壶已不能存水,将不再发展。

Notes: (a) A juvenile pothole, a little water logging pit on the top of granite, with a flat bottom. Darhan Muminggan United Banner, Inner Mongolia (41°43.075'N, 110°22.123' E, (1388±9.7)m). (b), (c) A young pothole, on a flat top of coarse-grained granite, is only about 4 to 5cm in depth, but has showed the characters of pothole, namely: smaller mouth, larger belly and flat bottom in Darhan Muminggan United Banner, Inner Mongolia(41°40.463'N, 110°10.003' E, (1576±10)m). (d) Middle stage potholes. The two potholes have connected in the bottom at the top of the Qingshan mount in Hexigten Global Geopark, Inner Mongolia. (e), (f) Potholes on the top of a stone egg, which suggests that the pothole could not be formed long time ago; (e) Two stone eggs; (f) Pothole on the top of the left stone egg at Eastern slope of the Qingyun Mount, Xintai, Shandong. (g) A two stage pothole; There is a circle protruding ridge and two nicks near the bottom, it suggests that the lower part beneath the protruding ridge is the second stage. After the right nick opened, the pothole could not be full of water over the protruding ridge, i.e. the top of the nick, therefore the upper part could not be enlarged; Now, because the left nick opened, too, the pothole has died at Qingyun Mount, Xintai, Shandong. The photo is taken by Lu Hongbo.(h) An abortive pothole. The left side is a cliff, and the wall of the pothole was destroyed by weathering erosion. Now, the pothole could not hold water, no longer developing, and has died.

作为古冰川的证据。

2 山脊壶穴只能是近现代的产物

北方的壶穴均生于裸露的山脊上,若是过去某一段时间内的产物,那么自形成以来它是一直暴露的,必然受到剥蚀。剥蚀速度和形成时间将决定其今日的保存完好程度。

据李晶莹和张经^[45]介绍,中国流域盆地化学风化率(据河流流量和其中溶解的若干离子计算)为 16—166t/(km²·a),机械剥蚀量(据河流的悬浮荷载计算)为 7—17800t/(km²·a),世界盆地化学风化率和机械剥蚀量平均值分别为 36t/(km²·a)和 150t/(km²·a)。假定流域内各点上的剥蚀速度相同,按岩石平均密度为 2.7t/m³ 计算,则中国流域盆地化学风化剥蚀掉的深度为 5.9—61mm/ka,机械剥蚀掉的深度为 2.6—6593mm/ka;世界平均化学风化剥蚀深度为 13.3mm/ka,机械剥蚀深度为 55.6mm/ka。据张丽萍等^[46-47]研究,三峡地区黄陵花岗岩的剥蚀速度为 16—45mm/ka。王利等^[48]研究大别山区(以变质岩和花岗岩为主)新近纪以来的剥蚀速度为 32—49mm/ka。可以看出,不同专家用不同方法得出的剥蚀速度均在每千年十几至几十毫米,故应当是可信的。

北方地区降水较少,气温较低,化学风化的速度应当慢于南方;但北方植被不发育,年温差、日温差均较南方大,物理风化的速度应当比南方强。并且,就在克什克腾世界地质公园的花岗岩石林景区,花岗岩石柱林立,显然不是冰盖存在时(如果有过冰盖的话)的地貌,而是冰盖消融后的风化产物,可以证明该区的风化剥蚀速度也是很快的。所以,“花岗岩是易风化的岩石”这一命题没有问题,韩同林等认为“冰臼”是 2—3Ma 前的产物,显然是忽略了还有地表风化这一因素。如果这些壶穴真是形成于 2—3Ma 前,那么它们早已灰飞烟灭了。即使按吕洪波等^[10-15, 36]的认识,这些壶穴是末次冰盛期(10ka 前)的产物,其顶部也应当被剥走 100mm 以上,现在看到的“出水口”等特征性“冰成”标志就不可能是真正意义上冰成的。所以,壶穴只能是近现代的产物。

地质特征也表明,壶穴是近现代的产物。在山东新泰青云山东坡,可见并列两巨型花岗岩石蛋(图 1(e)),其一顶面发育有壶穴(图 1(f))。可以看到,两石蛋的根部已被淘空,所以应当是近现代滚动过,其顶面的壶穴只能是滚动后开始发育的。值得注意的是,前述英格兰的 Wolverhampton 壶穴是在冰碛之下^[27];安大略省南东的壶穴区大部分基岩被厚 1m 以下的冰碛覆盖,少数低洼处可达几米^[31]。Archbald 壶穴是 1884 年被无烟煤矿工发现的,并马上清理了其中填的砾石,在其东北约 1000ft 处还发现了一个壶穴,但一直没有被清理出来^[28]。而中国东部的山脊壶穴均是长期裸露的。

3 冰成说归谬

1957 年, Higgins^[26]已经指出“简而言之,没有任何直接证据或间接证据表明‘磨坊作用’形成壶穴。而且,在‘磨坊’激

流能够保持足够长时间且足够经常地对准一个固定点这种希望渺茫的事件中,它们形成的壶穴也将与之前归咎于它们形成的壶穴极不相同”。

所以, Higgins^[26]已基本否定了壶穴成因的“磨坊假说”。下文将主要否定中国东部山脊壶穴的高速水流(含冰裂隙下落水及冰下冰川融水)成因可能,并为否定“磨坊假说”提供进一步证据。

(1) 吕洪波等已经发现壶穴(山脊)开口总在低洼一侧,这恰恰说明,这个开口不是高速水流(含冰裂隙下落水及冰下冰川融水)形成的,而是静态条件下形成的^[35]。若是高速水流,这个开口方向应当是随机的,因为,相对于高速水流(每秒几米以上)而言,坑顶几厘米高差可忽略不计,不会影响出水口的方向,决定出水口方向的将是坑底形态。只有在静态条件下,盆缘的微小高差才会决定水的溢出方向。

(2) 如果北方存在过大陆冰盖,那么其后期就应当有山谷冰川,为何在北方山谷中少见壶穴? 正确的解释可能是南方山谷河流流量大,可以冲出流水壶穴,而北方山谷河流流量小,不易形成流水壶穴。最近,在北京延庆大庄科发现原白龙潭是一个巨型壶穴,韩同林仍认为是 2—3Ma 前的“冰臼”,吕洪波^[14]则认为是末次冰盛期冰川壶穴。章雨旭^[14]发现,这个壶穴的位置特殊,是位于山区河谷拐弯且变窄的地方,应当是洪水中的旋涡形成的。

(3) 山脊壶穴在平面上无规则随机分布(如克什克腾旗青山山脊壶穴群)不支持“磨坊假说”。若是冰盖裂隙形成的落水,则壶穴应沿裂隙成线状排列。形成壶穴不可能一蹴而就,必须持续一定的时间,而在这段时间内,无法保证落水的水柱不产生位移,持续对准同一地点。

(4) 两壶穴从底部贯通不支持高速水流(含冰裂隙下落水及冰下冰川融水)冲蚀成因。在克什克腾世界地质公园可见多个壶穴在底部贯通(图 1(d)),但在地表仍是独立的壶穴。无论两壶穴是同时形成还是先后形成,贯通过后水流的形态必定要产生变化,产生出新形态的壶穴,极不可能保留两壶穴的形态与其他不贯通壶穴一致。

(5) “磨坊假说”解释壶穴是数百英尺的冰盖消融时顺着冰裂隙冲击基岩而成。显然冰裂隙不可能很宽,沿着冰裂隙下泻的冰水必然因附壁效应而沿壁下泻,不可能形成射流而直接冲击冰下的基岩。即使冰水可以快速下泻,但下泻冰水的出路不可能畅通(这也许正是冰下水流形成旋涡,进而可以形成冰川壶穴的原因)。

4 差异风化说的有利证据

关于克什克腾青山脊上壶穴的成因:“根据白生裸脊、口小肚大和白中存水等事实,笔者推测,正是白中存水这一原因导致了差异风化,使得原始的豆大小坑在几千年至几万年的历史长河中发展成了今日所见的斗大大坑。豆坑的成因可有多种偶然因素,如暗色包体的率先被风化脱落、长石斑晶

的率先脱落等。一旦成坑积水,它就将比不积水的地方有快得多的风化速度,因为在有水存在的条件下,花岗岩中的长石将更易被分解。随着水坑的加大,积水的量会越来越多,一年中积水的时间会越来越长,差异风化也就更加显著,坑就会加速发展。还有,冬天的雪会填满白坑,融化的雪水在一定的季节不可避免地会反复结冰、解冻,对白内的破坏也会比不存水的光脊强烈得多,从而加快风化剥蚀作用。由于该地区雨水主要集中在夏季,故坑中不会总是集满水的,所以坑的中、下部与水作用的时间会更长,风化更强;满坑大雪融化后的雪水也不可能满坑,故雪水的冰冻破坏也不能作用于口上;所以有口小肚子大的形态特征。由于这种差异风化、破坏在有植被或土壤覆盖的情况下就将不明显,故这种岩白只见于光秃的山脊之上^[20]。

现在看来,原始的小坑不一定是豆大的小坑,可能是岩石表面一片稍微低一点的区域(图1(a))。

壶穴为差异风化形成的有利证据主要有:

(1) 至今这类壶穴只发现于花岗岩的山脊上(仅浙江上虞在火山岩顶面^[8]),在力学性质相近的石英砂岩、变质岩等山脊上尚无发现。花岗岩在有水和无水的条件下风化速度差别极大,因为其中的长石在有水时很易被风化分解,而在无水时比较稳定。在石灰岩、石英砂岩和某些变质岩等中,即使它们与花岗岩的力学性质相近,但无论有水无水,风化速度差别不大,故不可能形成壶穴。北方山谷中由于植被覆盖不易形成风化差异或剥蚀太快,不易形成这种壶穴。南方山脊壶穴少见,已知报道的仅有在浙江上虞火山岩顶面^[8]和浙江缙云大洋山花岗岩^[2],原因可能有二:一是由于植被常常较好,较少裸露的山脊;二是南方降水频繁、温度高、蒸发速度快,总的剥蚀速度快,一方面形成浅水坑的机会少,岩石表面风化剥蚀速度差异相对不明显,另一方面即使偶有壶穴形成也不易保存。

(2) 壶穴平面形态近圆形、对称,表明不是外力作用造成的,若为外力作用,必然带有方向性,即使是垂直向地的水流,遇到不平的地表,形成的坑也不能是规则的近圆形。

(3) 口小肚大底平,可以用坑中积水导致风化速度加快来解释^[20],特别是口小肚大,不易用风等外力作用解释。白龙潭壶穴口小肚大明显,且底部有残留的多面锥体,则是旋涡形成^[14]。

5 壶穴形成过程的直接证据——壶穴是逐渐加深的

许多研究者更多注意的是“成年”壶穴——口小肚大底平,一般深十几厘米至几十厘米,事实上,壶穴是差异风化形成的,是“正在形成中”的近现代产物,所以现今所见的壶穴可以处于不同的发展阶段(图1)。孙洪艳等^[21]也已经指出,壶穴有萌芽→初具外形→发育中期→成熟→衰亡5个阶段。“幼年壶穴”在许多地方都可以见到,就是一些初始的凹坑,下雨时可以积水(图1(a))。图1(b)—(c)为一“青年壶穴”,见于内蒙古包头以北的达尔罕茂明安联合旗黑脑包附近平缓

的粗粒花岗岩顶面,约2m²的椭圆形平底坑,虽然只有4—5cm深,但已显现口小肚大的特点。由于这一地区的年降水很少,坑内与坑外的风化有差异的时间不长(仅在存水时才有差异),所以这个“青年壶穴”虽然在发育的阶段上尚处于年轻阶段(很浅),但其历史可能并不短。图1(d)为一“壮年壶穴”,在地表面它是一个独立的壶穴,但在底部已与另一壶穴沟通了。图1(h)是一个夭折的壶穴,由于左侧为陡崖,而风化作用将壶穴壁破坏,现在壶穴已不能存水,将不再发展。类似的位于斜坡边部的残缺壶穴有许多。图1(g)为一个两阶段壶穴,可以看到,在近底部有一圈凸出的脊。推测其成因是,左边和右边的两个缺口原来均是壶穴的壁,是封闭的,当风化剥蚀到这个脊的高度时,右边的缺口打开,壶中不能再存满水,故该脊线及其以上的壶肚不能再扩大。现在的脊是第二期的壶穴口,由于左边的缺口现在也已打开了,该壶穴已不再能够存水,事实上已经死亡。但是,如果人为地将这两个缺口堵上,使其可以积水,则该壶穴将“起死回生”。

6 差异风化成因可以更好地解释壶穴的地质特征

吕洪波等^[8]提出了关于壶穴“差异风化”模式的4个“难题”,本文可以做如下回答:

(1) “豆坑”的形成可以是偶然因素,但现在,从“幼年壶穴”及“青年壶穴”浅且面积较大来看,原始“蓄水坑”可以是山脊上的微凹地面,如图1(a)之情形。北方低洼(斜坡)处不见壶穴可能与植被影响或剥蚀速度太快有关,而南方(浙江)山脊已见壶穴^[8, 21]。

(2) 清理壶穴的动力是大风没有疑问。浅的壶穴中没有堆积,深的壶穴中可以有堆积,但即使有砂、土的堆积,其下仍可继续风化。壶底没有风化壳,应当是指较浅的壶底。可以发现,周边的裸脊上也根本没有风化壳,因为裸脊上总的剥蚀速度是很快的。前面已经说明,壶穴中的剥蚀速度比周边更快,壶穴中也不可能留存风化壳。较深的壶穴中已覆盖了土壤,还可以生长树木和花草(如克什克腾世界地质公园青山顶上的壶穴群),其底部的风化情况未得揭示。

(3) 从大庄科河谷壶穴看,河谷壶穴与山脊壶穴形态上并不相同。大庄科河谷壶穴底并不平坦,尚可见一剥蚀残柱,明显系旋转水流(旋涡)形成;而山脊壶穴的底面往往相当平坦且水平,非外力作用所能解释。

(4) 壶穴与节理相交,可能是节理裂开于壶穴形成之后。事实上,冰成说也不能解释高压水流可以对着裂缝形成一个平底圆坑。至于壶穴口缘呈尖棱状并非普遍现象,这与仍在进行中的风化作用有关。

7 延庆大庄科白龙潭壶穴成因

延庆大庄科白龙潭壶穴是北方少见的河谷壶穴,根据其产出位置和地质特征,章雨旭认为,它是一个洪水旋涡形成的河水壶穴^[14]:

(1) 壶穴位于山区河谷(大庄科河)拐弯且变窄处,这一

带河道的坡降达 1.5%(据 Google-earth), 这里有形成高速旋转旋涡的条件。

(2) 壶穴的形成可能经历了多次洪水。据当地老人介绍, 大庄科河在 1998 年、1974 年和 1939 年发生过 3 次大洪水, 表明该河谷发生洪水是较为经常的。

(3) 高速旋转的流体有强大的搬运能力, 如龙卷风可以将人卷上天空, 甚至普通的大风也可以飞砂走石。洪水时, 旋涡可以将这个壶穴内的碎石等清空, 裸现壶底, 再遭冲蚀、加深。所以, 20 世纪 60 年代的白龙潭正是最后一次洪水(可能是 1939 年的洪水, 因为 2010 年从壶穴中清理出来的手榴弹壳和铁制龙王像均表示时间不是很长, 壶穴中未见更老证据; 但也可能是更早的更大洪水)时的旋涡清空(或部分清空)先成壶穴(并可能再次加深、加大壶穴)后, 又被该洪水后期或后来较小洪水填充了河谷巨砾而成。1969 年修建了白龙潭桥, 改变了河道条件, 壶穴被填充, 并不再发展。

(4) 现在清出的完整壶穴可能是多次洪水的旋涡下蚀而成。其底座中心的残柱可能是因为随着壶底直径的加大, 其内的旋转水流对中心处的作用力变小(因为线速度小)。

(5) 底座中心的残柱指示壶穴中水流是逆时针方向旋转, 与所处地形吻合。

8 结论

(1) 由于花岗岩山脊或河谷均是不断被剥蚀的, 所以山脊壶穴不可能是古代的遗物, 只能是近现代的产物。

(2) 差异风化成因比冰川成因可以解释山脊壶穴更多的地质特征。

(3) 河谷壶穴是流水形成。

(4) 中国东部壶穴不能作为第四纪冰川的证据。

致谢 作者与韩同林研究员、吕洪波教授就山脊壶穴问题进行多次室内和现场探讨, 特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] 施雅风. 中国东部中低山地有无发育第四纪冰川的可能性? [J]. 地质论评, 2011, 57(5): 44-49.
Shi Yafeng. *Geological Review*, 2011, 57(5): 44-49.
- [2] 施雅风. 韩同林的“冰臼论”是对花岗岩类岩石“负球状风化”的误解 [J]. 地质论评, 2010, 56(3): 349-354.
Shi Yafeng. *Geological Review*, 2010, 56(3): 349-354.
- [3] 施雅风. 论李四光教授的庐山第四纪冰川是对泥石流的误读 [J]. 地质论评, 2010, 56(5): 683-692.
Shi Yafeng. *Geological Review*, 2010, 56(5): 683-692.
- [4] 李吉均, 舒强, 周尚哲, 等. 中国第四纪冰川研究的回顾与展望 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 235-243.
Li Jijun, Shu Qiang, Zhou Shangzhe, et al. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 235-243.
- [5] 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 河北省丰宁县喇嘛山冰臼群的发现及意义 [J]. 中国区域地质, 1998, 17(1): 103.
Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. *Regional Geology of China*, 1998, 17(1): 103.
- [6] 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 河北内蒙古发现罕见冰臼群 [J]. 地质论评,

- 1999, 45(5): 456-462.
Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. *Geological Review*, 1999, 45(5): 456-462.
- [7] 韩同林. 发现冰臼 [M]. 北京: 华夏出版社, 2004: 1-190.
Han Tonglin. *Moulin discovered* [M]. Beijing: Huaxia Publishing House, 2004: 1-190.
- [8] 韩同林, 陈尚平, 杜又常, 等. 浙江上虞发现罕见第四纪石冰川地貌及冰川遗迹 [J]. 地质论评, 2007, 53(2): 289-294.
Han Tonglin, Chen Shangping, Du Youchang, et al. *Geological Review*, 2007, 53(2): 289-294.
- [9] 赵国龙, 朱洪森, 李泊洋, 等. 论内蒙古第四纪冰川和冰臼群的成因 [J]. 中国区域地质, 2001, 20(2): 200-205.
Zhao Guolong, Zhu Hongsen, Li Boyang, et al. *Regional Geology of China*, 2001, 20(2): 200-205.
- [10] 吕洪波, 杨超. 山东新泰青山山发现第四纪大陆冰川遗迹 [J]. 地质论评, 2005, 51(5): 608.
Lü Hongbo, Yang Chao. *Geological Review*, 2005, 51(5): 608.
- [11] Lü Hongbo. An outline of earth sciences [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006, 1-367.
- [12] 吕洪波, 任晓辉, 杨超. 赤峰等地第四纪大陆冰川的地貌证据 [J]. 地质论评, 2006, 52(3): 379-385.
Lü Hongbo, Ren Xiaohui, Yang Chao. *Geological Review*, 2006, 52(3): 379-385.
- [13] 吕洪波, 任晓辉, 许民, 等. 再论山脊壶穴的冰川融水成因——兼与施雅风院士商榷 [J]. 地质论评, 2010, 56(5): 693-702.
Lü Hongbo, Ren Xiaohui, Xu Min, et al. *Geological Review*, 2010, 56(5): 693-702.
- [14] 吕洪波, 章雨旭, 王俊. 北京延庆白龙潭被揭示为一巨型山谷壶穴 [J]. 地质论评, 2010, 56(6): 886-887.
Lü Hongbo, Zhang Yuxu, Wang Jun. *Geological Review*, 2010, 56(6): 886-887.
- [15] Lü H B, Yan S Y, Zhang Y. Quaternary glacio-erosional landforms in Laoshan Mountain and their constraints on the origin of Jiaozhou Bay, Qingdao, east of China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007, 25(2): 139-148.
- [16] 徐兴永, 石学法, 于洪军, 等. 崂山顶、涧、沟、坡、麓、滩、岬一带巨砾成因研究 [J]. 海洋科学, 2004, 28(6): 10-13.
Xu Xingyong, Shi Xuefa, Yu Hongjun, et al. *Marine Sciences*, 2004, 28(6): 10-13.
- [17] 任晓辉. 克什克腾青山冰臼群自然保护区第四纪冰川地貌识别 [J]. 赤峰学院学报, 2005(2): 9.
Ren Xiaohui. *Journal of Chifeng College*, 2005(2): 9.
- [18] 赵志中, 钱方, 何培元, 等. 内蒙古克什克腾旗花岗岩石林的发现及成因 [J]. 地质论评, 2007, 53(S1): 98-103.
Zhao Zhizhong, Qian Fang, He Peiyuan, et al. *Geological Review*, 2007, 53(S1): 98-103.
- [19] 李洪江, 崔之久, 赵亮. 内蒙、河北山区壶穴的成因探讨——兼论壶穴的成因分类 [J]. 地理学报, 2001, 56(2): 223-231.
Li Hongjiang, Cui Zhijiu, Zhao Liang. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(2): 223-231.
- [20] 李德文, 崔之久, 李洪江, 等. 华北北部花岗岩风化穴形成机制与环境意义 [J]. 南京大学学报: 自然科学, 2003, 39(1): 120-128.
Li Dewen, Cui Zhijiu, Li Hongjiang, et al. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2003, 39(1): 120-128.
- [21] 孙洪艳, 田明中, 武法东. 克什克腾世界地质公园青山花岗岩臼的特征及成因研究 [J]. 地质论评, 2007, 53(4): 486-490.
Sun Hongyan, Tian Mingzhong, Wu Fadong. *Geological Review*, 2007, 53(4): 486-490.

- [22] 周尚哲. 锅穴一定是第四纪冰川的标志吗? [J] 第四纪研究, 2006, 26(1): 117-125.
Zhou Shangzhe. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 117-125.
- [23] 朱诚, 崔之久, 李中轩, 等. 浙江缙云县大洋山石鼓尖花岗岩坑穴成因[J]. 地理学报, 2008, 63(7): 735-743.
Zhu Cheng, Cui Zhijiu, Li Zhongxuan, et al. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 735-743.
- [24] 吕洪波, 章雨旭. 壶穴、锅穴、冰臼、岩臼等术语的辨析与使用建议[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 917-922.
Lü Hongbo, Zhang Yuxu. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(6): 917-922.
- [25] Gary M, McAfee R J, Wolf C L. Glossary of Geology [M]. Washington: American Geological Institute, 1972: 561.
- [26] Higgins C G. Origin of potholes in glaciated regions [J]. *Journal of Glaciology*, 1957, 21(3): 11-12.
- [27] Morgan A V. Late Weichselian potholes near Wolverhampton, England [J]. *Journal of Glaciology*, 1970, 55(9): 125-133.
- [28] Fleeger G M, Braun D D, Inners J D. Plunge into the past or go with the flow: Multiple hypotheses for the origin of the Archbald Pothole, Lackawanna County, Pennsylvania [EB/OL]. [2011-01-01]. <http://www.dcnr.state.pa.us/topogeo/gsaabstr/archbald.aspx>.
- [29] PA State Agencies. Archbald Pothole State Park [EB/OL]. [2010-12-30]. <http://www.dcnr.state.pa.us/stateparks/parks/archbaldpothole.aspx>.
- [30] Sodafixer J. Really big pothole [EB/OL]. [2010-12-30]. <http://www.flickr.com/photos/sodafixer/2972909014/in/photostream/>.
- [31] Gilbert R. The Devil Lake pothole (Ontario): Evidence of subglacial fluvial processes [J]. *Geographie Physique et Quaternaire*, 2000, 54(2): 245-250.
- [32] 崔之久, 李洪江, 南凌, 等. 内蒙、河北巨型壶穴与赤峰风道的发现[J]. 科学通报, 1999, 44(13): 1429-1434.
Cui Zhijiu, Li Hongjiang, Nan Ling, et al. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(13): 1429-1434.
- [33] 吴忱. “冰臼”是古地貌面上的流水侵蚀遗迹——壶穴一就韩同林《发现冰臼》一书中的资料谈华北北部的“冰臼” [J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(3): 74-77.
Wu Chen. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(3): 74-77.
- [34] 田明中, 孙洪艳, 武法东, 等. 克什克腾世界地质公园地质遗迹的科学价值 [C]// 第六届世界华人地质科学研讨会暨中国地质学会 2005 年学术年会论文集. 北京: 中国地质学会, 2005: 211-215.
Tian Mingzhong, Sun Hongyan, Wu Fadong, et al. Scientific interest of the geological heritages in the Hexigten Global Geopark [C]// The Abstracts of the 6th World Chinese Conference on Geological Sciences & Annual Meeting of 2005 of the Geological Society of China. Beijing: Geological Society of China, 2005: 211-215.
- [35] 章雨旭. “冰臼”成因争鸣——以克什克腾旗青山岩臼群为例[J]. 地质论评, 2005, 51(6): 680, 712.
Zhang Yuxu. *Geological Review*, 2005, 51(6): 680, 712.
- [36] 吕洪波, 任晓辉, 许民, 等. 壶穴差异风化或风蚀作用成因质疑[J]. 地质论评, 2008, 54(2): 192-198.
Lü Hongbo, Ren Xiaohui, Xu Min, et al. *Geological Review*, 2008, 54(2): 192-198.
- [37] 韩同林. 驳施雅风“冰臼”“负球状风化”成因论[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 538-542.
Han Tonglin. *Geological Review*, 2010, 56(4): 538-542.
- [38] 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 关于南国冰臼群成因的商榷 [J]. 热带地理, 2000, 20(1): 72-80.
Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. *Tropical Geography*, 2000, 20(1): 72-80.
- [39] 韩同林. 广东饶平首次发现大量古冰川遗迹 [J]. 地质论评, 2001, 47(4): 382.
Han Tonglin. *Geological Review*, 2001, 47(4): 382.
- [40] 韩同林, 劳雄, 郭克毅. 关于南国冰臼群成因商榷之二 [J]. 热带地理, 2001, 21(2): 189-195.
Han Tonglin, Lao Xiong, Guo Keyi. *Tropical Geography*, 2001, 21(2): 189-195.
- [41] 陈华堂, 丘世钧, 黄山, 等. 揭西丰顺“冰臼群”成因商榷[J]. 热带地理, 1999, 19(4): 376-380.
Chen Huatang, Qiu Shijun, Huang Shan, et al. *Tropical Geography*, 1999, 19(4): 376-380.
- [42] 李孟华, 谢小康. “冰臼”与“壶穴”之争 [J]. 热带地理, 1999, 19(4): 381-384.
Li Menghua, Xie Xiaokang. *Tropical Geography*, 1999, 19(4): 381-384.
- [43] 刘尚仁. 关于冰臼形成与保存机理认识上的几个误区 [J]. 热带地理, 2000, 20(2): 156-161.
Liu Shangren. *Tropical Geography*, 2000, 20(2): 156-161.
- [44] 杨超群. 冰臼与壶穴之争述评[J]. 热带地理, 2001, 21(1): 86-93.
Yang Chaoqun. *Tropical Geography*, 2001, 21(1): 86-93.
- [45] 李晶莹, 张经. 中国主要流域盆地风化剥蚀率的控制因素[J]. 地理科学, 2003, 23(4): 434-440.
Li Jingying, Zhang Jing. *Chinese Geographical Science*, 2003, 23(4): 434-440.
- [46] 张丽萍. 风化花岗岩土壤允许侵蚀量确定方法研究 [J]. 中国水土保持, 2002(7): 38.
Zhang Liping. *Soil and Water Conservation in China*, 2002(7): 38.
- [47] 张丽萍, 杨达源, 朱大奎. 母岩的风化剥蚀速率与土壤允许流失量的关系——以长江三峡坝区风化花岗岩土壤为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(4): 381-387.
Zhang Liping, Yang Dayuan, Zhu Dakui. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(4): 381-387.
- [48] 王利, 周祖翼, 丁汝鑫. 大别造山带毗邻新生代盆地物质平衡分析[J]. 地质论评, 2007, 53(3): 301-305.
Wang Li, Zhou Zuyi, Ding Ruxin. *Geological Review*, 2007, 53(3): 301-305.

(责任编辑 郑伟, 刘志远)