

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.02.002

引用格式:王照波,王江月,李宝杰. 吉林长白山天池第四纪火山旋回性喷发与冰川作用的耦合关系[J]. 华东地质, 2020, 41(2):108-115.

吉林长白山天池第四纪火山旋回性喷发与冰川作用的耦合关系

王照波^{1,2,3}, 王江月⁴, 李宝杰³

(1. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 济南 250013;
2. 沂蒙山国家地质公园管理局, 临沂 273304; 3. 山东指南针矿产勘查有限公司, 临沂 276006;
4. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 日照 276800)

摘要: 长白山天池火山喷发活动贯穿整个第四纪, 旋回性明显, 发育良好的冰川遗迹, 为火山喷发与冰川作用的耦合性研究提供了有利条件。文章通过对长白山天池第四纪火山喷发旋回及火山岩分布特征研究, 收集火山喷发年代学与冰期—间冰期旋回年代学数据, 并利用卫片解译了火山喷发与冰蚀 U 谷的关系。在年代学数据的约束下, 根据天池火山锥体周边广泛发育的 U 谷遗迹, 将研究区冰川作用分为 3 个冰期: 锦江冰期、漫江冰期和二道白河冰期, 分别对应中国东部鄱阳冰期、大姑冰期和庐山冰期。长白山天池火山造锥阶段喷发形成的白头山组 3 个阶段(I、II、III), 与上述 3 个冰期具有良好的耦合关系。天池内部冰斗为白头山冰期(即中国东部东山冰期, MIS4)产物, 经黑风口冰期与气象站冰期(即中国东部蒙山冰期, MIS2)、全新世冰川作用及火山作用的双重改造, 其基本特征保存至今。长白山天池冰盖消融导致的释压反弹, 可能诱发了天池火山呈旋回性喷发。

关键词: 火山喷发; 冰川作用; U 谷; 长白山天池; 释压反弹

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2020)02-108-08

迄今为止, 吉林长白山一带第四纪冰川遗迹的期次划分仍存在诸多争议。一种以孙建中^[1]为代表, 认为该区保存全系列第四纪古冰川作用的遗迹, 主要依据分布在望天鹅火山周边的冰碛物, 将第四纪冰川作用由早到晚划分为四等房冰期、腰岭冰期、布老克冰期、二道岗冰期和白头山冰期, 分别对应中国东部龙川冰期、鄱阳冰期、大姑冰期、庐山冰期和大理冰期。孙广友等^[2]将孙建中^[1]建立的冰期重新划分为望天鹅冰期(即四等房冰期)、锦江冰期、鸭绿江冰期(即二道岗冰期)和白头山冰期, 但未进行冰碛物年龄测试。另一种以施雅风等^[3]为代表, 认为该区仅发育末次冰期及之后的冰川作用。末次冰期长白山的雪线为 2 100~2 200 m, 且仅限于白头山天池附近。裘善文^[4]认为天池火山一带冰

川发生于末次冰期晚期, 当时雪线为 2 200 m, 部分下延至 1 600~1 800 m 的槽谷属于冰缘地貌的“雪蚀槽谷”, 认为二道白河形似 U 谷, 不一定是冰川作用形成的。张威等^[5-6]和李川川^[7]认为长白山发育末次盛冰期(LGM)与晚冰期, 时间分别为 20.0±2.1 ka 和 11.3±1.2 ka。综合多种雪线确定方法, 认为天池火山末次盛冰期的雪线为 2 300±20 m, 晚冰期的雪线约 2 465 m。将海拔 2 000~2 100 m 的区域命名为黑风口冰进(冰期), 将海拔 2 400~2 600 m 的区域命名为气象站冰进(冰期)。

除了上述获得的具有明确年龄值的黑风口冰期与气象站冰期外, 目前尚无研究者对天池地区更古老的冰川作用及存在的时代进行研究, 原因是长白山天池火山后期喷发作用破坏或覆盖了前期冰川作用

* 收稿日期: 2019-07-29 修订日期: 2019-12-01 责任编辑: 叶海敏

基金项目: 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室“山东金刚石成矿规律与侵位时代研究(编号: 201403)”和山东指南针矿产勘查有限公司“东亚冷槽探索计划(编号: 20180101)”项目联合资助。

第一作者简介: 王照波, 1971 年生, 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查、第四纪冰川与环境演化研究。

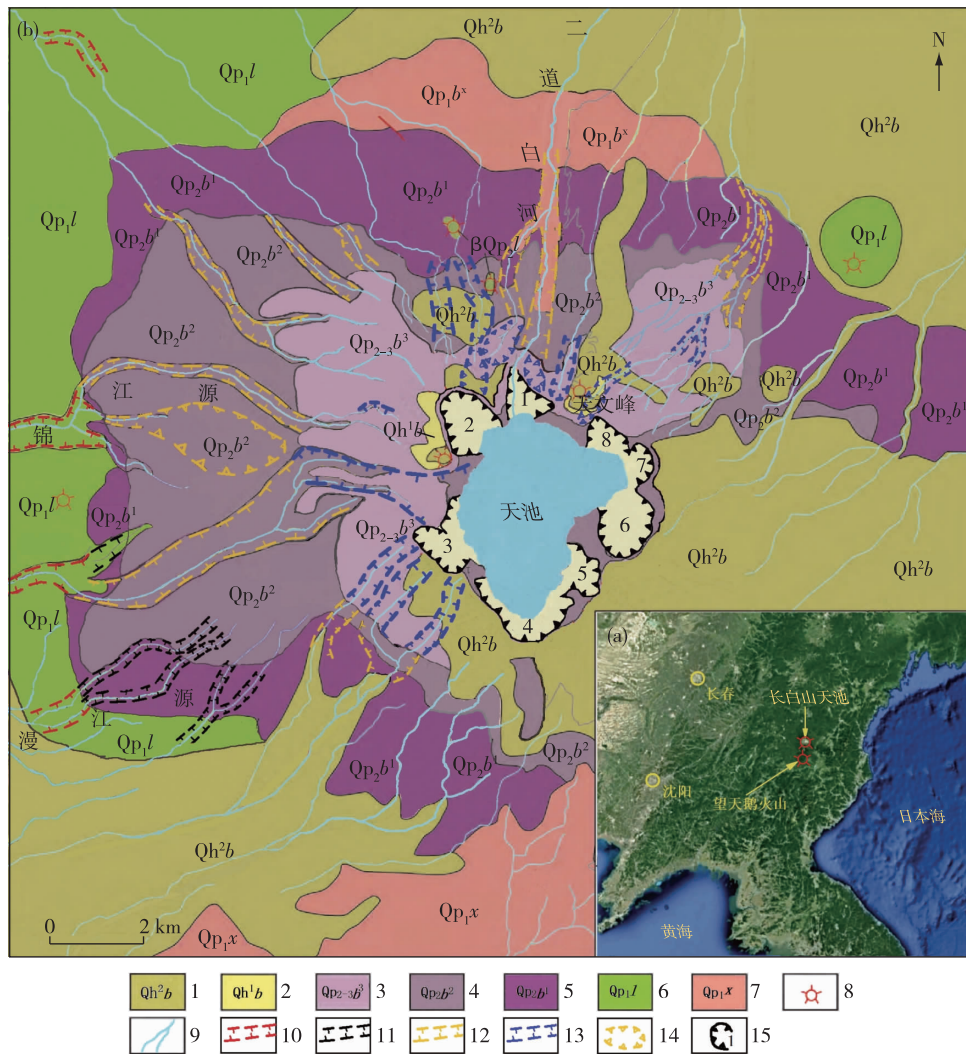
遗迹。火山喷发虽然可以破坏前期形成的冰川遗迹,但随着火山岩测年手段的多样化及测年精度的不断提高,以及年龄跨度远大于冰碛物测年方法(如 ^{14}C 、光释光、宇生核素等)^[8]的应用,为约束火山喷发期次、限定冰川期次提供了可能性。冰蚀作用形成的地貌遗迹(如 U 谷)很难彻底被破坏,尤其当火山喷发强度递减的情况下,U 谷更可能得到有效遗存。

由于长白山天池火山在第四纪存在多期次旋回喷发,其造锥作用过程中火山喷发强度递减导致锥体覆盖面积也逐次递减。此外,近年获得大量火山岩年龄数据,为利用卫星图片分辨冰蚀 U 谷与火

山熔岩提供了条件。结合笔者近年对冰川期次、冰川遗迹和冰蚀地貌研究成果^[9-17],建立长白山天池火山旋回性喷发与冰川作用间的相互关系,进一步分析火山地貌的演化过程。

1 火山岩时空分布特征

长白山天池火山位于吉林省东部与朝鲜接壤地带(图 1(a)),是我国最大的休眠火山,我国境内最高峰为白云峰,海拔 2 691 m。天池火山喷发活动贯穿第四纪,火山喷发旋回性明显,大量年代学数据为天池火山岩喷发旋回的建立奠定了基础。



1.中全新世白云峰组;2.早全新世冰场组;3.晚更新世白头山组Ⅲ段;4.中更新世白头山组Ⅱ段;5.中更新世白头山组Ⅰ段;6.早更新世老房子小山组;7.早更新世小白山组;8.火山口;9.水系;10.锦江冰期 U 谷;11.漫江冰期 U 谷;12.二道白河冰期 U 谷;13.东山冰期 U 谷;14.大姑冰期冰斗;15.冰斗及编号

图 1 长白山天池火山喷发环带与冰蚀 U 谷叠压关系图(据文献[20]与卫片解译)

Fig. 1 Superimposed relationship between volcanic eruption zone and ice erosion U-shaped valley in Tianchi, Changbai Mts

1.1 火山岩分布

长白山天池火山岩具有盾-锥特征,其喷发历史可以分为 2 个阶段:第一阶段是以玄武质岩浆喷发为主的造盾阶段;第二阶段是以粗面岩、碱流岩喷发为主的造锥阶段。

玄武岩盾主要分布在海拔 1 200 m 以下,构成天池火山基座。玄武岩最早喷发始于 5 Ma 左右,在 2.0~1.2 Ma 喷发规模最大,形成长白山玄武岩盾^[18]。盾体主要由上新世军舰山组玄武岩(4.5~2.1 Ma)^[19]和早更新世漫江组玄武岩(2.0~1.2 Ma)^[20]组成。

由粗面岩组成的锥体分布在 1 200 m 之上火山口周围。以火山口为中心,由外向内,天池火山锥呈由老到新的环带状(图 1(b))。造锥阶段早期以粗面岩为主,构成火山锥体主要部分;造锥阶段晚期以碱流岩为主,呈席状覆盖在锥体最上部^[21],主要为早更新世小白山组粗安-粗面岩(0.96 Ma)^[20]、老房子小山组粗面玄武岩(0.87 Ma)^[22]。中一晚更新世白头山组 3 个阶段的粗面岩构成天池火山锥主体,其中 I 阶段为 0.61~0.53 Ma^[18],II 阶段为 0.44~0.25 Ma^[18],III 阶段为 0.13~0.08 Ma^[22]。潘波^[23]分别建立了天文峰期(50.6 ka)、气象站期(11.3 ka)和千年爆发期(0.95 ka),八卦庙期火山岩喷发时间为 0.85 ka^[24]。

1.2 火山岩年龄

根据前人对长白山天池火山喷发地质调查与测年结果^[18-24],将天池火山喷发旋回及年龄数据列于表 1。

表 1 长白山天池火山喷发旋回及年龄统计

Table 1 Eruption cycles and age data of Tianchi volcano in Changbai Mts

时代	岩石组	岩性	喷发时间
全新世	八卦庙期	粗面质浮岩、火山灰	0.85 ka ^[24]
	千年爆发期	碱流质浮岩	0.95 ka ^[23]
	气象站期	碱流质熔岩	11.30 ka ^[23]
晚更新世	天文峰期	碱流质浮岩	50.60 ka ^[23]
	白头山组 III 段	粗面岩	0.13~0.08 Ma ^[22]
中更新世	白头山组 II 段	粗面岩	0.44~0.25 Ma ^[18]
	白头山组 I 段	粗面岩	0.61~0.53 Ma ^[18]
早更新世	老房子小山组	玄武岩	0.87 Ma ^[22]
	小白山组	粗安、粗面岩	0.96 Ma ^[20]
	漫江组	粗面玄武岩	2.0~1.2 Ma ^[20]
上新世	军舰山组	橄榄玄武岩	4.5~2.1 Ma ^[19]

白头山组与天文峰期火山岩喷发于中一晚更新世,与第四纪冰川发育期相同,为冰川期次划分提供了年代学资料。

2 火山旋回性喷发与冰川作用的耦合关系

火山喷发形成的锥体与冰川作用形成的 U 谷是宏观地貌现象,规模可达数百米至数千千米,为卫星照片解译提供了可能。位于雪线之上的火山锥在冰期受冰蚀作用后形成冰蚀地貌(冰斗、U 谷)。冰蚀地貌遭受火山岩掩盖,构成“火山喷发—冰蚀雕刻—火山掩盖—冰蚀雕刻”的循环关系。根据火山岩年代学数据建立喷发旋回(图 1(b),表 1),可知长白山天池火山喷发活动贯穿整个第四纪,其造锥过程的喷发强度逐渐减弱。深海氧同位素阶段(MIS)气候演化的冰期旋回^[25]与冰期年龄值为建立火山喷发与冰期旋回提供了年代学基础。深海沉积物中底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 值可推断不同时期的温度和全球冰量变化,反映冰期与间冰期的环境交替,即 MIS 曲线奇数阶段为暖期,对应间冰期(阶),偶数阶段为冷期,对应冰期(阶)。此外,深海氧同位素阶段的划分与测年数据相结合,MIS 曲线可完整记录第四纪全球气候的演化规律^[15]。

2.1 老房子小山组—锦江冰期 U 谷—白头山组 I 段的叠压关系

老房子小山组玄武岩(0.87 Ma)^[22]广泛分布在天池火山西侧盾体,构成第一级锥体(图 1(b))。其上是典型的 U 谷,U 谷上方被白头山组 I 段粗面岩(0.61~0.53 Ma)^[18]掩盖,形成一级台阶(图 1(b),图 2(b))。根据 MIS 演化阶段,在两期岩浆喷发之间为 MIS16^[25],即 0.65 Ma 左右的中国东部鄱阳冰期或欧洲贡兹冰期^[15]。据此认为,该 U 谷形成时代为中国东部鄱阳冰期,仅在 U 谷上端及冰斗部分被白头山组 I 段粗面岩掩盖。

残存的 U 谷长 4 km,宽 350~500 m(图 2(b)),分布在海拔 1 200~1 500 m 处,构成锦江河源头区,是长白山地区最早具年代约束的冰川遗迹,故将其命名为锦江冰期,对应中国东部鄱阳冰期。现锦江峡谷景观带上端即为锦江冰期 U 谷内部,经历 60 余万年流水侵蚀切割,在谷内形成窄小 V 谷。

2.2 白头山组 I 段—漫江冰期 U 谷—白头山组 II 段的叠压关系

白头山组 I 段喷发于 0.61~0.53 Ma^[18],II 段

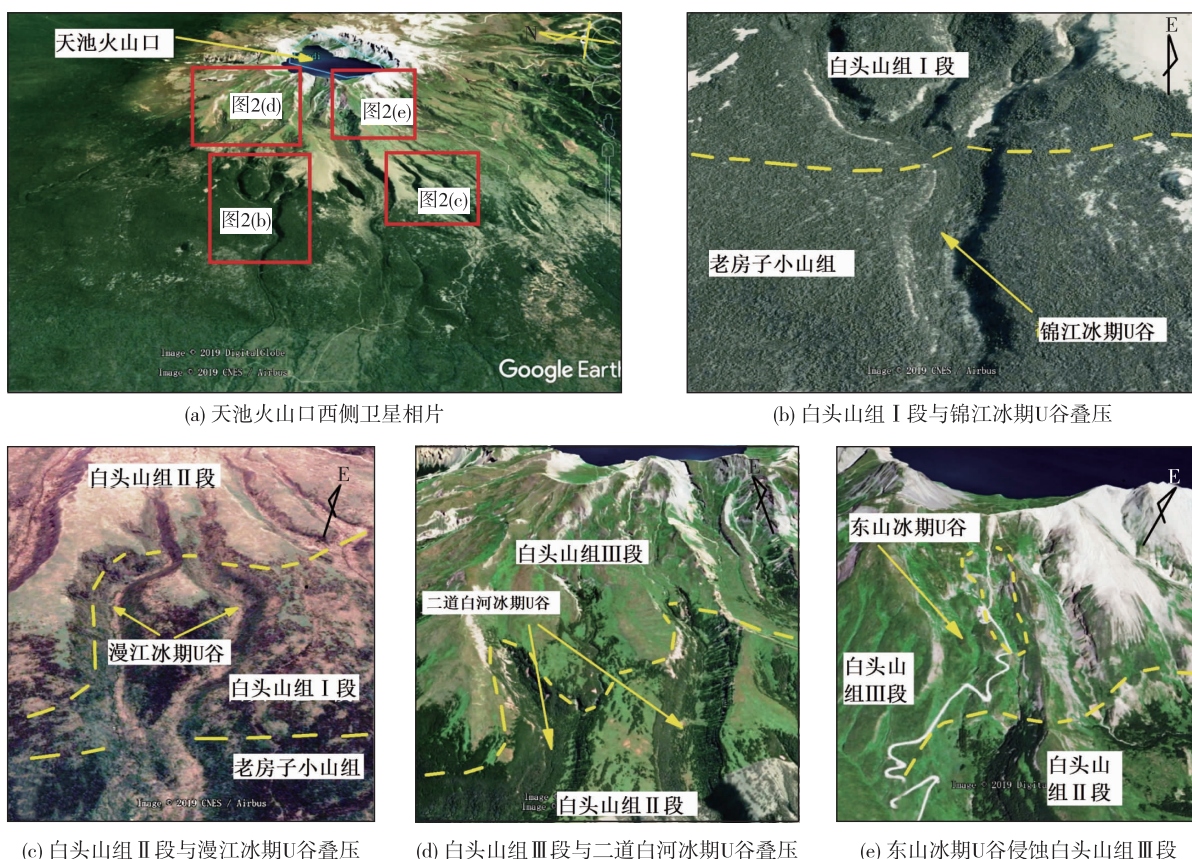


图 2 天池火山锥西侧火山喷发旋回与各冰期冰蚀 U 谷的叠压关系

Fig. 2 Superimposed relationship between the volcano eruption cycle in the west Tianchi volcanic cone and the ice erosion U-shaped valley during each ice period

喷发于 $0.44 \sim 0.25 \text{ Ma}$ ^[18]。 0.53 Ma 与 0.44 Ma 之间对应于 MIS12 阶段^[25],即距今 0.45 Ma 的中国东部大姑冰期或欧洲民德冰期^[15](图 3),该时段出露 U 谷。

白头山组 I 段与 II 段的火山喷发面积接近, I 段粗面火山岩的冰蚀地貌多数被 II 段粗面岩覆盖。此时 U 谷在漫江发源天池的支流源头区出露较好(图 1(b),图 2(c)),由 2 条并列的 U 谷组成,长约 2.7 km ,宽约 350 m ,海拔 $1470 \sim 1700 \text{ m}$ 。根据冰川遗迹的年代学数据约束,将该时期 U 谷的冰期称为漫江冰期,对应中国东部大姑冰期。

2.3 白头山组 II 段—二道白河冰期 U 谷—白头山组 III 段的叠压关系

白头山组 II 段($0.44 \sim 0.25 \text{ Ma}$)^[18]在火山锥体分布广泛,其上分布典型 U 谷,U 谷之上被白头山组 III 段粗面岩($0.13 \sim 0.08 \text{ Ma}$)^[22]覆盖,形成台阶(图 1(b),图 2(d))。根据 MIS 演化阶段,两期岩浆

喷发之间为 MIS6 阶段^[25],即 0.15 Ma 左右的中国东部庐山冰期,或欧洲里斯冰期(图 3)^[15]。

该时期残存 U 谷长 4 km ,宽 650 m (图 2(d)),分布在海拔 $1500 \sim 1900 \text{ m}$ 处。长白山天池二道白河 U 谷是有年代学数据约束的冰川遗迹,将 U 谷在该区的冰期命名为二道白河冰期,对应中国东部庐山冰期。

2.4 末次冰期冰川遗迹

白头山组 III 段粗面岩最晚喷发于 0.08 Ma ^[22](表 1),分布在天池火山口周边(图 1(b))。该套火山岩形成的 U 谷延伸到天池火山最高处(图 2(e)),对应于 MIS4 阶段^[25],是距 0.07 Ma 的东山冰期,即欧洲玉木冰期早冰阶的遗留部分^[15]。其后依次为天文峰期(0.05 Ma)^[23]及碱流质爆炸式喷发火山碎屑岩,无法完全覆盖东山冰期冰蚀 U 谷,其分布海拔为 $2000 \sim 2600 \text{ m}$ 。该冰期遗迹分布在白头山周围,以往将末次冰期称为白头山冰期,本文将末

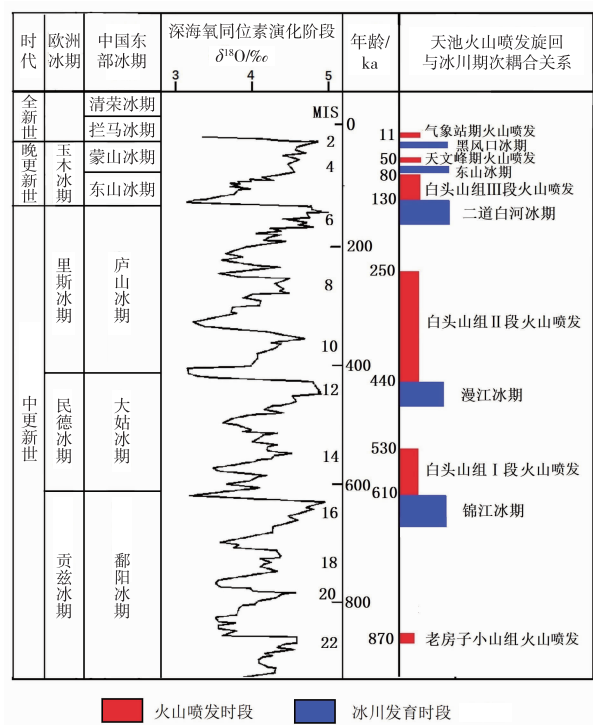


图3 天池火山喷发旋回与冰期的耦合关系

Fig. 3 Coupling between volcanic eruption cycles and ice age of Tianchi volcano

次冰期早冰阶对应的冰期改称为白头山冰期。

末次冰期晚冰阶对应于 MIS2 阶段^[25],距今 2 万年左右的蒙山冰期,即欧洲玉木冰期晚冰阶^[15]。由于冰川规模远小于东山冰期^[10],其卫片影像辨识度较差。张威等^[5-6]通过冰碛遗迹测年研究,将海拔 2 000~2 100 m 区域划分为黑风口冰进(冰期),时代为 20.0 ± 2.1 ka;将海拔 2 400~2 600 m 区域划分为气象站冰进(冰期),时代为 11.3 ± 1.2 ka。

2.5 全新世冰川遗迹

目前,关于天池火山全新世冰川遗迹的研究尚无报道。山东蒙山全新世冰碛测年划分出 8.2 ka 的拦马冰期和 5.3 ka 的清荣冰期^[10,12],长白山火山口是否存在与拦马冰期或清荣冰期对应的冰碛遗留,这有待于进一步研究。

3 讨论

3.1 二道白河 U 谷成因与形成时间

崔天日等^[20]研究了天池北侧二道白沟典型 U 谷,推测其形成与断裂相关。孙建中^[1]认为二道白

河 U 谷是冰川作用形成的。孙广友等^[2]认为二道白河峡谷为冰川 U 谷(图 4(a)),形成时代为中更新世早期老布克冰期(即中国东部大姑冰期)。裘善文^[4]认为二道白河形似 U 谷,但不一定是冰川谷。潘波^[23]认为二道白河 U 谷是由第四纪高山冰川作用形成的 U 型深谷。

根据火山岩喷发期次与二道白河同期次 U 谷的关系,笔者认为二道白河为冰川 U 谷,形成时代为中国东部庐山冰期(MIS6),并非大姑冰期。二道白河 U 谷比其他同期 U 谷延伸长,原因是白头山组 III 段粗面岩喷发时,在二道白河分布区喷溢流量较少,未被大面积覆盖,二道白河 U 谷才能完整保存。二道白河 U 谷顶端冰斗斗底高程约 1 960 m,推测庐山(二道白河)冰期最高雪线约 1 960 m,其他同期 U 谷也应达到近似高程,只是被后期白头山组 III 段粗面岩覆盖才形成“半截 U 谷”。推测在 MIS6 阶段火山口也应形成相应的冰斗地貌,但被白头山组 III 段粗面岩掩盖而未见。

3.2 天池火山口冰斗形成时间

天池火山口共有 8 个冰斗,其形成时间尚无定论。根据冰斗位置,逆时针将火山口冰斗分别编为 1~8 号(图 1(b)、图 4(b)、(c)、(d))。张威等^[5]对 3 号冰斗(青石峰冰斗)进行冰碛测年,获得 11.3 ± 1.2 ka 的年龄,发现末次冰盛期的冰碛垄^[26-27],表明火山口冰斗至少形成于 MIS2 阶段。因火山口冰斗斗底高程高于庐山冰期二道白河 U 谷冰斗高程,可认为其形成时代为中国东部庐山冰期(MIS6)之后,最早于东山冰期(MIS4)形成。火山口冰斗地貌的形成在白头山组 III 段粗面岩喷发之后(80 ka 后)。结合山东蒙山末次冰期冰川规模,东山冰期(MIS4)冰川规模是蒙山冰期(MIS2)冰川规模的数十倍^[10,12]。研究表明,天池火山口冰斗形成时间为 MIS4 阶段,其后经历浮岩等碎屑岩的爆炸式喷发,冰川作用侵蚀未对 MIS4 阶段形成的冰斗地貌进行改造。目前,天池火山口基本地貌特征在 MIS4 阶段形成后基本定型并维持到现今。局部地段受后壁海拔高程影响,在之后的冰期,2 号、3 号、5 号、6 号冰斗进一步达到 2 400 m 的海拔。在 MIS4 冰期,天池水面远低于现今水面,使 MIS4 在火山口内形成的冰碛被淹没。根据外侧冰蚀地貌,认为 MIS4 阶段冰期的最低雪线约为 2 000 m。

3.3 二道白河与天池贯通时间

中国东部庐山冰期(MIS6)形成 U 谷后,二道



①.八卦庙期火山岩;②.千年大喷发火山岩;③.湖相沉积层

图 4 长白山天池及周边 U 谷、冰斗与湖相沉积特征照片

Fig. 4 U-shaped valley, cirques and lacustrine sedimentary features in Tianchi, Changbai Mts and its surrounding area

白河成为源头(图 4(a))保持至今, MIS6 阶段在火山口内形成的冰斗被后期规模巨大的白头山组 III 段粗面岩掩盖, 但二道白河 U 谷保存下来。MIS4 阶段冰期, 在乘槎河重新形成 1 号冰斗(图 4(b)), 二道白河源头受冰川避谷作用影响, 在原来冰斗前端两侧形成“羊角谷”, 冰蚀作用未使二道白河与天池贯通, 只是削低了连接处的高程, 该高程应高于现在水面 100 m 左右。

潘波^[23]在 1 号冰斗内乘槎河西坡剖面确认八卦庙期(0.85 ka)黑色粗面岩沉积在白色碱流质浮岩(0.95 ka)之上, 白色浮岩之下为松散砂砾石堆积物, 砾石磨圆度较好, 反映经过了湖水反复冲刷。该处高出现今水位 50 m(图 4(c))^[23], 表明乘槎河的贯通时间在千年大喷发之前、湖相砾石层形成之后, 推测应为中晚全新世, 可能在 4 ka 左右的暖湿雨季, 大量降水提升了天池水位, 没过 1 号冰斗后壁外泄, 从而贯通二道白河, 在 1 号冰斗内形成乘槎河, 在二道白河冰斗后壁形成长白山瀑布。

3.4 长白山是否存在前鄱阳冰期

前人在望天鹅火山周围发现冰川沉积并建立了四等房冰期、腰岭冰期、老布克冰期和二道岗冰期^[1]。腰岭冰期和二道岗冰期位于阶地表面, 属于鄱阳冰期后的某一冰期沉积。四等房冰期与老布克冰期可能位于望天鹅火山岩覆盖之下, 也可能在望天鹅火山岩层中。望天鹅火山的最后喷发时间为 2.41 Ma^[22], 这些夹望天鹅火山喷发层的冰碛层时代应为早更新世早期或上新世晚期。

3.5 长白山冰盖消融释压反弹与火山喷发的关系

火山喷发与冰川消融存在明显的耦合关系(图 3)。火山喷发紧随冰川消融, 其内在因素尚不清楚, 但是冰盖消融导致地面释压反弹已有不少研究^[28-32]。长白山天池火山第四纪大规模旋回性喷发, 是否与冰盖消融释压反弹有关, 这需进一步研究。

4 结论

(1)长白山天池火山锥体周边发育第四纪冰川遗迹,划分了锦江冰期(鄱阳冰期)、漫江冰期(大姑冰期)和二道白河冰期(庐山冰期)。长白山地区锦江冰期的最低雪线约为 1 200 m,漫江冰期的最低雪线约为 1 470 m,二道白河冰期的最低雪线约为 1 500 m。

(2)二道白河 U 谷是冰川作用形成的典型 U 谷,形成时间为中国东部庐山冰期。二道白河与天池的贯通时间为中晚全新世。4 ka 左右的暖湿期降水没过了 1 号冰斗与二道白河冰斗之间的刃脊,天池水外泄。

(3)长白山天池火山旋回性喷发可能与天池冰盖消融释压导致地下岩层反弹隆升有关。

致谢: 本研究得到了中国石油大学吕洪波教授、南京师范大学黄家柱教授、中科院海洋研究所赵松龄教授、南京大学杨达源教授、自然资源部第一海洋研究所徐兴永研究员、中国地质科学院地质力学所钱方教授、中国科学院南京湖泊研究所于革教授、中国地质科学院地质研究所苏德辰研究员、河南地矿职业学院张先教授、赤峰学院顾晓辉教授的帮助与支持,审稿专家与编辑提出了诸多良好建议,在此致以诚挚的谢意!

注:文中卫星图片均引自 google earth。

参考文献

- [1] 孙建中. 吉林省第四纪冰期的划分[J]. 地质学报, 1982(2): 174-186.
- [2] 孙广友, 王海霞, 范宇. 中国东北第四纪冰川研究新进展: 遗迹厘定、新发现与冰期模式[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 55-65.
- [3] 施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 363-374.
- [4] 裘善文. 长白山古冰川、冰缘地貌的研究[J]. 第四纪研究, 1990(2): 137-145.
- [5] 张威, 牛云博, 闫玲, 等. 吉林长白山地晚更新世冰川作用[J]. 科学通报, 2008, 53(15): 1825-1834.
- [6] 张威, 闫玲, 崔之久, 等. 长白山现代理论雪线和古雪线高度[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 739-745.
- [7] 李川川. 吉林长白山晚更新世以来火山作用与冰川演化的关系[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008: 1-22.
- [8] 陈文寄, 李齐, 李大明, 等. 中、新生代火山岩年龄测定中的几个值得重视的问题[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 72-81.
- [9] 王照波, 卞青, 李大鹏, 等. 山东蒙山第四纪冰川组合遗迹的发现及初步研究[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 134-142.
- [10] 王照波, 张剑, 王江月, 等. 山东蒙山第四纪冰川遗迹光释光测年研究及冰期划分与对比[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 694-702.
- [11] 王照波, 王江月. 中国东部末次冰期雪线高程重建与成冰气候分析[J]. 山东国土资源, 2017, 33(11): 1-5.
- [12] 王照波, 王江月, 冯金华, 等. 山东蒙山全新世冰川遗迹的发现及确认——来自宇生核素年龄的证据[J]. 山东国土资源, 2018, 34(6): 1-5.
- [13] 王照波, 王江月, 王全义, 等. 豫西甘山第四纪冰斗系统的发现及其与 MIS 的耦合关系分析[J]. 山东国土资源, 2018, 34(7): 1-7.
- [14] 王照波, 王江月. 渐新世“雪球事件”的发现及其意义——基于全球冰斗系统的解读与研究[J]. 山东国土资源, 2018, 34(9): 1-8.
- [15] 王照波, 王江月, 张剑. 山东蒙山第四纪冰川、黄土、水系沉积物与 MIS 对比研究[J]. 华东地质, 2019, 40(2): 81-90.
- [16] 王照波, 王江月. 山东蒙山与四川海螺沟冰川擦痕的特征对比与成因分析[J]. 山东国土资源, 2019, 35(6): 11-18.
- [17] 王照波, 王江月. 山东蒙山冰川遗迹的类型、特征和年代——答王乃昂教授、李吉均院士质疑[J]. 地质论评, 2019, 65(3): 603-622.
- [18] 刘嘉麒, 陈双双, 郭文峰, 等. 长白山火山研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(4): 710-723.
- [19] 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究[J]. 岩石学报, 1987, 3(4): 23-33.
- [20] 崔天日, 钱程, 江斌, 等. 长白山天池火山 CZK07 钻所揭示的火山地层层序和火山作用特征[J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2409-2422.
- [21] 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 等. 长白山天池火山的岩浆演化[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(3): 226-231.
- [22] 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 等. 长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1449-1457.
- [23] 潘波. 长白山天池火山晚更新世以来喷发序列研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2016: 6-13.
- [24] 金伯录, 张希友. 吉林省长白山全新世火山喷发期及火山活动特征[J]. 吉林地质, 1994, 13(2): 1-12.
- [25] IWATA S, DOUGLAS I, DAVID J A. Evans; Glacier and Glaciation [J]. Geographical review of Japan

- series, 2011, 84(6):627-629.
- [26] 牛云博. 长白山冰缘地貌过程及其与环境演化的关系[D].大连:辽宁师范大学,2008;1-18.
- [27] 闫玲. 长白山冰川演化及其对生态环境的影响[D].大连:辽宁师范大学,2008;1-20.
- [28] EKMAN, M. A concise history of postglacial land up lift research (from its beginning to 1950)[J]. Terra Nova, 2007,3(4):358-365.
- [29] EKMAN, M. A consistent map of the post glacial up-lift of Fennoscandia[J]. Terra Nova, 1996, 39(8): 158-165.
- [30] JALDEHAG R T K, JOHANSSON J M, DAVIS J L, et al. Geodesy using the Swedish Permanent GPS Network: Effects of snow accumulation on estimates of site positions [J]. Geophysical Research Letters, 1996,23(13): 1601-1604.
- [31] JOHANSSON J M, DAVIS J L, SCHEMECK G A, et al. Continuous GPS measurements of post-glacial adjustment in Fennoscandia, part I: Geodetic results [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2002, 107(B): 2157-2184.
- [32] PLAG H P B, ENGEN T A, CLARK J J, et al. Post-glacial rebound and present-day three-dimensional deformations[J]. Journal of Geodynamics, 1998, 25(3/4):263-301.

Coupling relation between cyclic eruption of Quaternary volcano and ancient glacier in Tianchi, Changbai Mts

WANG Zhao-bo^{1,2,3}, WANG Jiang-yue⁴, LI Bao-jie³

(1. Laboratory of Gold Mineralization Process and Resource Utilization, Ministry of Natural Resources, Jinan 250013, China; 2. Yimeng National Geological Park Management Office, Linyi 273304, China; 3. Shandong Compass Mineral Exploration co., Ltd, Linyi 276006, China; 4. College of Geography and Travel, Qufu Normal University, Rizhao 276800, China)

Abstract: Volcanic magma eruption in Tianchi of Changbai Mountain run through the whole Quaternary period. It is characterized by distinct eruption cycle and well developed glacier relics, providing beneficial conditions for the study of coupling relation between volcanic eruption and glaciation. This paper analyzed eruption cyclic of Quaternary volcanos and distribution characteristics of volcanic rocks using collecting the chronological statistic data of volcanic eruptions and the cycle of ice age and interglacial, along with superposition relationship between volcanic eruption and ice erosion U-shaped valley. Based on the chronological data and the well-developed U-shaped valley around Tianchi volcanic cone, the glaciation can be divided into three ages: Jingjiang Ice Age, Manjiang Ice Age and Erdaobaihe Ice Age, in response to Poyang Ice Age, Dagu Ice Age and Lushan Ice Age in the eastern of China, respectively. Eruption of Tianchi volcano in Changbai Mts formed three stages of Baitoushan Formation (I. II. III), which couple well with three Ice Ages mentioned above. The ice cirque in Tianchi formed during Baitoushan Ice Ages (i.e. Dongshan Ice Age, MIS4, in the eastern of China). Even experiencing double transformation during Heifengkou Ice Age and Qixiangzhan Ice Age (Mengshan Ice Age, MIS2, in the eastern of China), and Holocene glaciation and volcanism, its basic features have been preserved until today. Ice sheet melting of Changbai Mts resulted in rebounding of pressure release, which may induce the cyclic eruption of Tianchi volcano.

Key words: volcanic eruptions; glaciation; U-shaped valley; Tianchi of Changbai Mts; pressure release rebound