

柴达木盆地西部湖相地层风力侵蚀 对黄土高原物源贡献的研究进展

李永国¹, 安福元^{2,3}, 张启兴¹, 赵洪菊⁴

(1. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海省水文地质及地热地质重点实验室, 青海 西宁 810008; 2. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 4. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810008)

摘要:柴达木盆地是我国西北地区最干旱的盆地之一, 常年盛行强劲的西北风, 尤其在冬春季更甚。柴达木盆地西部地区自新生代以来沉积了巨厚的河湖相沉积。自上新世晚期以来, 随着气候的逐步干化和盆地内部构造变形的加剧, 该地区风力侵蚀地貌开始出现。早更新世出现的古盐壳和古雅丹地貌说明当时侵蚀已经相当剧烈。晚更新世以来, 气候的极端干旱化和冰期的出现, 更加促进了风蚀地貌的发育, 在强劲的低空风力的雕刻下, 形成了盆地西部几万平方千米的“百万雅丹”地貌, 十分壮观。柴达木盆地不同地区地层的厚度和风蚀速率都不同, 最大分别可达3 000 m和1.1 mm/yr, 如此巨量的物质搬运必然为下风向的地区(都兰、青海湖地区、西宁盆地、黄土高原)的粉尘堆积提供可观的物源物质。研究表明, 柴达木盆地西部被侵蚀的古湖相地层是上述地区, 尤其是黄土高原重要的物源物质。随着研究的深入, 其盆地内侵蚀物质输送到黄土高原的机制, 已得到学界越来越清晰的认识。

关键词:风力侵蚀; 湖相沉积; 柴达木盆地西部地区; 物源; 黄土高原

中图分类号: P512

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2017)02-0105-07

1 前言

地处中国西北部干旱区的柴达木盆地是我国四大盆地之一, 自第三纪以来沉积了厚达数千米的冲洪积—河湖相沉积^[1]。该盆地沉积中心自古新世以来自西向东不断迁移, 目前的沉积中心已达盆地中东部的察尔汗地区^[2]。由于盆地西部的抬升以及沉积中心的转移, 使得西部古老的河湖相, 尤其是湖相沉积地层暴露于地表, 加之强烈的构造变形和强劲的西北风共同作用, 使之遭受了大规模的侵蚀, 形成了

大面积的、独特的雅丹地貌^[3]。这种巨量的风力侵蚀和物质向东搬运, 必然为柴达木盆地以东地区, 包括都兰地区、青海湖地区、河湟谷地乃至更东的黄土高原提供了可观的风尘物质^[4-5]。本文就上述柴达木盆地湖相地层的风力侵蚀、粉尘搬运过程、物源物质贡献等方面的最新研究进展做一些介绍, 总结归纳盆地地貌演化过程和粉尘贡献的有用信息。

2 柴达木盆地主要的风蚀地貌

柴达木盆地现代主要的地貌单元包括雅

收稿日期: 2016-03-20; 修回日期: 2016-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401008); 青海省自然科学基金项目(2016-ZJ-926Q)和中国科学院“西部之光”项目资助

作者简介: 李永国(1967-), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质研究工作。

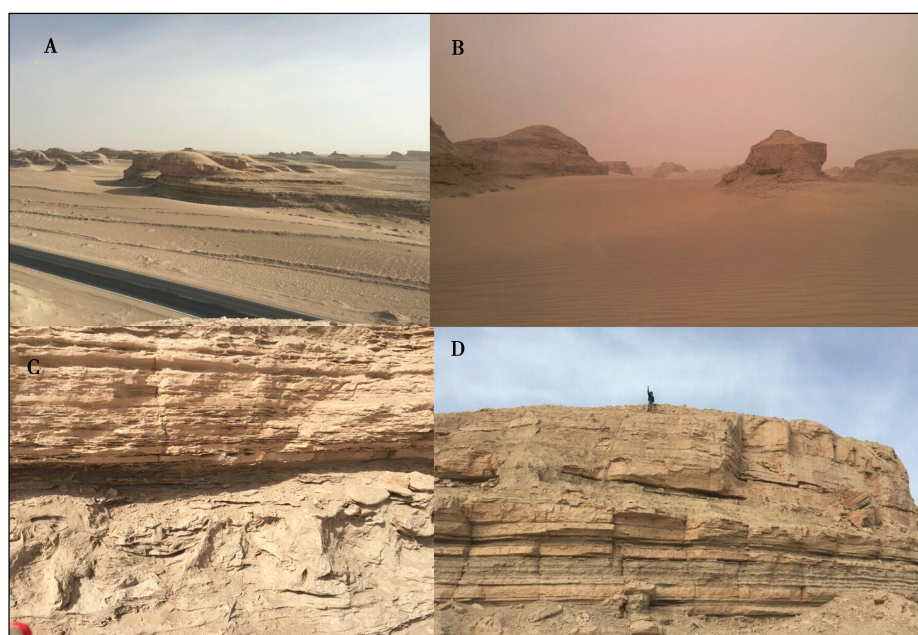
通信作者: 安福元。Email: dongzhu8@sina.com。

丹、戈壁、沙丘、干盐滩以及河流冲积扇,在这些地貌单元中,雅丹是主要的风蚀地貌,占整个盆地地表面积的三分之一以上,是该地区主要地貌形态^[3]。柴达木盆地的雅丹地貌主要分布在盆地中西部地区,数百万平行的雅丹沙脊呈西北—东南走向,非常壮观,并且与该地区的盛行风向一致^[3,6]。这些雅丹的高度从几米到几十米不等,主要形态是迎风面比较陡,背风面是缓坡。在平行风向的方向上有些雅丹可以延伸几百米,有的则形成独立的近似锥形的小丘,延伸几米到几十米(图 1A,B)。雅丹顶部有一层厚约几十厘米的坚硬盐壳保护,阻止了这些雅丹的快速风蚀^[7]。柴达木盆地雅丹地貌的总体特征是,西部构造发育地区的雅丹群规模宏大,极其壮观,常常形成高数十米,延伸几百米的巨型雅丹,如在黄瓜梁地区;而在中东部平坦的一里坪、台吉乃尔地区,往往会形成规模较小,但展布面积很大的雅丹地貌^[8]。

柴达木盆地的雅丹地貌形成过程是多期的。Kapp 等在盆地西部的雅丹剖面中发现早更新世形成的古盐壳,这些盐壳的存在说明当

时该地区经历了一次比较大的风力侵蚀,形成了古雅丹地貌^[3]。由于这些地区湖相沉积的厚度非常厚,故而早期的风蚀无法完全剥蚀完整个地层,而后期的成湖过程又将古剥蚀面(古盐壳)掩埋,形成了多期的风蚀地貌过程(图 1C)。青藏高原自中新世以来的强烈隆升,柴达木盆地的构造作用十分强烈,导致盆地内部多期构造变形,加之古气候的干湿旋回,成为盆地西部古雅丹地貌多期形成的主要原因^[9]。

面积达 $3.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的柴达木盆地雅丹地貌的形成,是经历了自上新世以来漫长的强劲风力侵蚀的结果^[10]。这些雅丹地貌在形成过程中,巨量的物质被风力侵蚀和搬走,使之成为盆地东部乃至更远地区的沙漠和黄土的物质来源地^[3,11-12],因此,柴达木盆地的雅丹群作为其内部最主要的侵蚀地貌,对于盆地东部地区,如都兰地区、青海湖地区、西宁盆地、贵德盆地,乃至更远的黄土高原的粉尘贡献越来越受到学界的重视,使之成为近年来第四纪地质学界研究的热点。



A、B 为柴达木盆地雅丹规模和形态;C 为古盐壳残余侵蚀面;D 为雅丹纵剖面。

A and B are the scale and feature of yardangs; C shows the efflorescent salt crust; D shows the profile of one big yardang

图 1 柴达木盆地雅丹地貌图

Fig. 1 The topography of yardangs for Qaidam Basin

3 柴达木盆地主要风蚀地层

柴达木盆地的风蚀地层是其西部至中部的巨厚古湖相地层(面积占整个盆地的50%以上,厚度超过1 km),这些地层主要以细砂、粉砂和粘土组成(图1D),这些湖相沉积的沉积年代主要在上新世至更新世之间^[10]。Kapp等通过卫星遥感和地质图研究认为,柴达木盆地西部的古湖相沉积自第四纪以来就遭受了严重的侵蚀^[3]。他们粗略估计,盆地西部的花土沟地区剥蚀的地层厚度为754~858 m;在昆特依—察汗斯拉图一带为463~1 492 m;冷湖地区为490 m;南八仙地区为683 m;一里坪地区为820~1 080 m。分析发现,剥蚀厚度较大的区域都是构造变形较为强烈的地区,比如西部的大风山一带,中部的一里坪褶皱区。在这些构造变形最强烈的地区,比如一里坪北部大背斜顶部,被风蚀的厚度可能超过3 km。对整个盆地来说,其沉积地层的年侵蚀率是非常高的。如此巨量的物质被侵蚀,超乎想象。在强劲的西北风的作用下,这些被搬用的物质会成为柴达木盆地东部地区风成砂和黄土的堆积,其贡献是显而易见的。

Heermance等认为柴达木盆地主要的雅丹地貌地层为上新世的狮子沟组和更新世的七个泉组^[10]。当然,通过笔者的地貌观察,更老的上、下干柴沟组和油砂山组都会有侵蚀,只不过相对于较细的上新世和更新世湖相沉积,更老的地层中物质的粒度也更粗、时代更老、硬度更高,可能经历了更复杂的侵蚀过程。比如由于构造作用导致地层隆起成山,再由水流冲刷较软的泥沙岩,形成广阔的山前冲积扇填充物,而这些冲积扇物质在风力的作用,细颗粒很容易被侵蚀、搬运。花土沟地区的油砂山流水冲刷形成的千沟万壑和山前平坦冲积扇的地貌就是这种侵蚀过程的体现。由于上新世以来强烈的构造变形和剧烈的气候变化共同的作用,盆地内部广阔易碎的深湖相粉砂及粘土沉积很容易被风力侵蚀,形成目前“百万雅丹”的壮观地貌。Heermance等在盆地内部风蚀最严重地区之一的一里坪北部大背斜顶部测定了一条北北

东—南南西走向、长度超过1 km的剖面,时代从上新世一直连续到晚更新世。通过地层、古地磁和碳氧同位素的分析后,他们认为晚上新世以来柴达木盆地气候逐渐变干,同时期盆地内部的构造变形开始启动,在该时期地层中出现的古雅丹和古盐壳说明柴达木盆地这时已经开始了风力侵蚀过程。由于同期的构造活动和干旱气候,造成了盆地内湖相地层的侵蚀,这同黄土高原黄土沉积的年代大体一致^[10]。

4 柴达木盆地沉积物风蚀过程

4.1 柴达木盆地沉积物风蚀的动力基础

每年的冬春季,在来自西伯利亚冷空气团的作用下,强劲的西北风吹过柴达木盆地上空,形成猛烈的冬季风,加之该地区常年盛行较强的西风^[13-14],是现代柴达木盆地地层侵蚀的主要动力。当寒潮到来时,盆地内大量暴露于地表的湖相细颗粒物被卷入空中,经过几百千米的搬用,沉降在其东部地区。笔者有记录的是2012年11月2日,由于强劲冷空气来袭,青海北部地区出现大范围的沙尘扬沙天气,各地拉响大风沙尘预警,在冷湖地区甚至出现了强沙尘暴(http://www.qh.xinhuanet.com/201211/02/c_113591457.htm)。这次强沙尘暴过程给柴达木盆地东部的西宁地区带来非常大的尘降,其降尘量达17.4 g/m²。然而,在气候条件比现在更恶劣、风力更强劲的冰期,柴达木盆地的侵蚀就更加厉害。Kapp等认为在间冰期,极地喷流的主轴位于西伯利亚上空,柴达木盆地的风力偏弱;而在冰期,由于极地喷流的南移,使其正好经过柴达木盆地上空,加剧了该地区的风力强度,从而造成盆地内沉积物的风力侵蚀主要发生在地质历史时期的各个冰期^[3]。An等研究发现,察尔汗盐湖中的湖相沉积中存在着大量的风成物质,主要是来自盆地西部的古湖相沉积,其驱动力为强劲的东亚冬季风,冬季风侵蚀这些古湖相物质,并且将它们搬运到了下风向的各个地区^[11]。另外,区域内干旱的气候也加剧了这种风力的侵蚀。该地区年平均降水量为26 mm,而蒸发量却超过3 000 mm,气

候极端干旱。自早更新世以来,盆地内一直处于极端干旱的环境,加之构造活动频繁,更加有利于风蚀地貌的形成。

4.2 柴达木盆地风蚀的起始年代和侵蚀率

较早的研究认为柴达木盆地是一个沉积盆地而非侵蚀盆地^[15-16]。2009 年 Heermance 等首次提出柴达木盆地西部的古湖相经历了严重的风力侵蚀过程,形成了规模巨大的雅丹地貌,而这些物质的侵蚀—搬运—沉降过程很可能与黄土高原黄土的堆积有一定的联系^[9]。2011 年, Kapp 等人详细实地调查了柴达木盆地西部的雅丹地貌,并通过卫星遥感和相关地质图分析,认为柴达木盆地自 2.8 Ma 以来就开始侵蚀。通过昆特依—察汗斯拉图、冷湖、南八仙横剖面的研究认为,这些剖面更新世以来的地层已经被风力侵蚀了。昆特依—察汗斯拉图剖面厚度达 1 492 m,部分构造强烈的地区甚至厚达 3 000 m。对于整个盆地来说,其平均侵蚀率为 0.29 mm/yr,最大侵蚀率为 1.1 mm/yr。通过计算,可以算出高达 32 000 km³ 湖相物质从盆地里面被侵蚀掉^[3]。2013 年 Rohrmann 等人通过宇宙核素¹⁰B 浓度法系统地测定了柴达木盆地西部地区 12 个不同地点的侵蚀率,发现侵蚀率在 0.003~0.4 mm/yr 之间,其平均侵蚀率为 0.125 mm/yr。虽然这个值低于 Kapp 等人估计的数值(0.29 mm/yr),但他们认为盆地内其它构造变形更剧烈的地方的侵蚀率应该更高,而且在冰期地表侵蚀的程度更加厉害。这是因为:第一,他们所采样品的剖面是在更老的中新世地层,其硬度更硬,比较抗侵蚀;第二,在不同时期的侵蚀率可能不一样,在相对湿润的中新世,侵蚀率偏低,而气候干旱、风力强劲的第四纪冰期,其侵蚀率远远高于中新世^[17]。同年, Heermance 等通过长达 1 km 的横剖面(一里坪北大背斜顶部)的古地磁定年,将盆地地层开始侵蚀的年龄提前到 3.1 Ma,同时该地区构造变形的年代也为 3.0 Ma 左右。碳氧同位素指标显示,从 3.1 Ma 开始柴达木盆地开始明显变干,2.6 Ma 以后蒸发岩开始沉积和古雅丹地貌的出现^[10]。Han 等通过光释光和铀系测年法较系统调查了柴达木盆地西部地表和钻孔顶部

年代,发现其年代均在 0.1 Ma 左右,说明其上部十万年以来沉积的物质被风力侵蚀;虽然他们认为柴达木盆地西部地层的侵蚀率没有此前测定的那么高,但是即使这样,对于 700 km 长, 300 km 宽的整个盆地来说,十万年以来被风力搬运的沉积物质的数量也是相当可观的^[7]。

4.3 构造和气候对柴达木盆地沉积物风蚀的控制

柴达木盆地西部湖相地层的风蚀过程离不开强烈的构造活动和干旱多风气候的共同作用。具体来说,湖相地层被风蚀的速率主要取决于气候的干旱程度、风力的大小、沉积物的胶结程度、粗细程度以及构造活动导致地层抬升变形的程度^[3]。如前所述,中新世地层由于胶结较好,硬度较硬,比上新世和更新时地层更难侵蚀;再者,对于一里坪北部大背斜顶部比较破碎地层的侵蚀率比较高,而黄瓜梁一带严重褶皱的构造地形造就了该盆地最壮观的雅丹地貌,其雅丹高度超过 100 m,长达 200~400 m。处于主风道地区的侵蚀率明显高于其它风力偏弱的地区,这从雅丹地貌形成的规模和广度上也可以看出。同时,柴达木盆地西部地层自第三纪以来一直在抬升,而抬升的地层必然会遭受侵蚀,而且抬升越快,其侵蚀的速率越快。比如喜马拉雅山脉在中新世的侵蚀率约为 1 mm/yr,而到了更新时则提升到 2~3 mm/yr^[18]。在盆地西部地层的风力侵蚀过程中,气候和构造二元要素基本上都是相辅相成的,但也有阶段性。3.6~2.6 Ma 期间,由于青藏高原北部的抬升,使得印度季风难以到达柴达木盆地,直接导致了该盆地内部的干旱化^[19],这与 2.8~2.6 Ma 黄土高原黄土沉积的开始时间基本一致^[20],说明黄土源区的侵蚀加剧。而 3.0 Ma 柴达木盆地西部大型褶皱的开始,也加剧了这种侵蚀和粉尘传输过程^[10]。这种侵蚀加剧的年代还对应于全球冰量的增加和冰期—间冰期旋回的开启^[3]。2.6 Ma 以后,相对于构造,气候逐渐主导了柴达木盆地内部的侵蚀。1.2 Ma 以后气候干湿变化更加频繁,总体上干旱化加剧,而气候主导的湖泊面积的大小控制了盆地内风蚀的程度^[10]。前人的研究

认为第四纪以来相对于构造,气候是柴达木盆地风力侵蚀的主控因素,但应该设想第四纪恰恰是青藏高原隆升和构造变形最厉害的阶段,而盆地其它区域新构造运动活跃,因而构造活动对于盆地地层侵蚀的重要程度不容忽视。

5 柴达木盆地对黄土高原黄土的物源贡献

柴达木盆地作为黄土高原风成物质的主要源区之一,越来越成为物源研究的热点地区^[3,11,21]。盆地西部古湖相地层自上新世以来的不断风力侵蚀,使它们成为黄土高原黄土沉积的重要物源地区。最早 Bowler 等分析了青海湖盆地和柴达木盆地的地球化学元素特征,认为柴达木盆地可能是黄土高原西部黄土沉积的重要源区^[22]。饶文波、Chen 等分析了西部不同沙漠区风尘堆积和黄土高原黄土的 Nd-Sr 同位素特征,指出在末次冰期柴达木盆地西部侵蚀的湖相地层是黄土高原的重要物源区之一^[12,23]。Kapp 等通过气候模型分析认为,在冰期由于极地喷流南移 10°,正好经过柴达木盆地上空,强烈的风力携带被侵蚀了的柴西古湖相物质,沉降在黄土高原,成为黄土高原黄土的主要物源物质。根据计算,超过 50% 的黄土来自柴达木盆地的古湖相地层^[3];其中,黄土高原黄土中的粗颗粒物质主要来自柴西湖相盆地中的细砂和粉砂。随后 Pullen 等通过对柴达木盆地和青藏高原北部地表样品碎屑锆石的 U-Pb 年龄研究,支持了这种观点(黄土高原黄土和柴达木盆地的碎屑锆石的 U-Pb 年龄都集中在 225 ~ 330 Ma 和 380 ~ 490 Ma 之间)^[21]。2012 年 An 等的柴达木盆地钻孔样品的地球化学分析发现,该盆地湖相沉积样品的主要地球化学元素同都兰地区、青海湖地区、西宁地区和黄土高原黄土一致,说明了它们的同源性^[11]。2013 年 Heermance 等研究了柴达木盆地上新世以来的剖面发现,该剖面显示的 3.0 Ma 以来盆地内构造活动的加剧、2.6 Ma 以来气候的干旱化和 2.4 Ma 古雅丹侵蚀地貌的出现均与黄土高原黄土沉积通量的突然增加在时间上基本一致,由此也认为柴达木盆地是黄土高原的主

要物源^[10]。同年, Che 等通过碎屑锆石的 U-Pb 年龄的对比发现,西宁地区的黄土完全来自柴达木盆地,而黄土高原的黄土主要来自柴达木盆地和阿尔泰戈壁的混合源^[24]。最新的研究通过不同地区不同沉积相中 2 410 个碎屑锆石的 U-Pb 年龄研究发现,柴达木盆地在冰期贡献了最高达 20% 的物源物质,而其它 60% ~ 70% 的物质是通过黄河搬运,并经过风力的二次筛选、搬运和混合后沉降在黄土高原^[25]。黄河作为青藏高原东北部主要的河流,其重要的支流湟水河及其干流都流经西宁盆地、贵德盆地、民和盆地等主要的柴达木粉尘沉降区^[11,24,26],其携带的泥沙物质也很大程度上夹杂了来自柴达木盆地的物质,虽然经过二次搬运,但本质上还是该盆地的物质,只是搬运的过程比此前的认识更加复杂。

6 结 语

柴达木盆地自新生代以来沉积了巨厚的古湖相沉积,随着西北—东南向的沉积中心的转移,盆地西部的地层经历了强烈的风力剥蚀,其第四系沉积物几乎被侵蚀殆尽。目前,柴达木盆地西部的古湖相沉积在强劲的风力侵蚀下形成壮观的“百万雅丹”地貌^[3,10,21,27],成为青海省潜在的旅游开发地区之一。自 3.1 Ma 以来,在气候和构造的共同作用下,巨量的细颗粒物质被风力侵蚀和搬运走,风蚀程度最强烈的地区被侵蚀的地层厚达 3 km。如此巨量的物质被搬运出盆地,必然对东部的青海湖地区、河湟地区乃至黄土高原地区的黄土沉积提供可观的粉尘物质。近年来,随着研究者对柴达木盆地西部地层风力侵蚀和物源示踪的研究越来越深入,发现这些物质的搬运无论在时间尺度上(冰期—间冰期旋回)、空间展布上(盆地物源和其它地区物源的贡献程度),还是在搬运过程上(风力、水力和混合搬运)对其东部地区的风成物质物源贡献都显得愈加重要。在未来,随着对柴达木盆地西部古湖相地层侵蚀历史、物质搬运过程研究的推进,将对以下研究产生重要意义。第一,大气粉尘的全球循环研究,来自盆地的粉尘物质不仅仅是黄土高原的物源物

质,甚至可能到了太平洋、北美以及格陵兰冰盖;第二,盆地内壮观的“百万雅丹”地貌的研究能加深其它行星(如火星)上类似地貌形成过程的理解,有助于宇宙类地行星地貌的研究;第三,随着柴达木盆地和黄土高原物质的源—汇过程研究,必将推动新的物源示踪方法的发展,包括电子自旋共振方法(ESR)的物源示踪尝试、卫星遥感的后向轨迹技术的进步和粉尘传输路径上的现代监测技术等。总之,柴达木盆地以自身具有的独特条件,会继续吸引更多的科学家去探索和研究。

参考文献:

- [1] Chen K Z, Bowler J M. Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 54(1-4): 87-104.
- [2] 黄麒, 韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 121-146.
- [3] Kapp P, Pelletier J D, Rohrmann A, *et al.* Wind erosion in the Qaidam basin, central Asia: Implications for tectonics, paleoclimate, and the source of the Loess Plateau [J]. *GSA Today*, 2011, 21(4-5): 4-10.
- [4] 陈骏, 李高军. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(9): 1211-1232.
- [5] Wan D, Jin Z, Wang, Y. Geochemistry of eolian dust and its elemental contribution to Lake Qinghai sediment [J]. *Applied Geochemistry* 2012, 27(8): 1546-1555.
- [6] Goudie A S. Mega-yardangs: A global analysis [J]. *Geography Compass*, 2007, 1(1): 65-81.
- [7] Han W, Ma Z, Lai Z, *et al.* Wind erosion on the north-eastern Tibetan Plateau: constraints from OSL and U-Th dating of playa salt crust in the Qaidam Basin [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 39(6): 779-789.
- [8] 范锡朋. 柴达木盆地西北部冷湖地区地貌概论. *地理学报*, 1962, 28(4): 275-287.
- [9] Heermance R V, Kapp P, Rohrmann, A, *et al.* Extreme winds during the Quaternary deduced from yardang preservation within lacustrine sediments in the Qaidam Basin, China [J]. *Eos (Transaction, American Geophysical Union)*, 2009, 90(52): PP 21B-1341.
- [10] Heermance R V, Pullen A, Kapp P, *et al.* Climatic and tectonic controls on sedimentation and erosion during the Pliocene-Quaternary in the Qaidam Basin (China) [J]. *GSA Bulletin*, 2013, 125(5/6): 833-856.
- [11] An F Y, Ma H Z, Wei H C, *et al.* Distinguishing aeolian signature from lacustrine sediments of the Qaidam Basin in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoclimatic implications [J]. *Aeolian Research*, 2012, 4(6): 17-30.
- [12] Chen J, Li G, Yang J, *et al.* Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3904-3914.
- [13] Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1232-1239.
- [14] Fan Q S, Ma H Z, Wei H C, *et al.* Holocene Lake-level changes of Hurlig Lake on northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and possible forcing mechanism [J]. *The Holocene*, 2014, 24(4): 274-283.
- [15] Chen K Z, Bowler J M. Preliminary study on sedimentary characteristics and evolution of palaeoclimate of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin [J]. *Scientia Sinica (Series B)* 1985, 28(11): 1218-1231.
- [16] 王建, 黄巧华, 柏春广, 等. 2.5 Ma 以来柴达木盆地的气候干湿变化特征及其原因 [J]. *地理科学*, 2002, 22(1): 34-38.
- [17] Rohrmann A, Heermance R, Kapp P, *et al.* Wind as the primary driver of erosion in the Qaidam Basin, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 374(4): 1-10.
- [18] Rahl J M, Ehlers T A, van der Pluijm B A. Quantifying transient erosion of orogens with detrital thermochronology from syntectonic basin deposits [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 222(1-2): 147-161.
- [19] An Z, Kuztzbach J E, Prell W L, *et al.* Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since late Miocene time [J]. *Nature*, 2001, 411: 62-66.
- [20] An Z. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 171-187.
- [21] Pullen A, Kapp P, McCallister A T, *et al.* Qaidam Basin and northern Tibetan Plateau as dust sources for the Chinese Loess Plateau and paleoclimatic implications [J]. *Geology*, 2011, 39(11): 1031-1034.
- [22] Bowler J M, Chen K Z, Yuan B Y. Systematic variations in loess source areas evidence from Qaidam Basins, Western China [M]. In: Liu Tungsheng (Ed), *Aspects of loess research Beijing, China Ocean Press*, 1987, 39-51.
- [23] 饶文波, 杨杰东, 陈骏, 等. 中国干旱—半干旱区风尘物质的 Sr, Nd 同位素地球化学: 对黄土来源和季, 风演变的指示 [J]. *科学通报*, 2006, 51(4): 378-386.
- [24] Che X, Li G. Binary sources of loess on the Chinese Loess

- Plateau revealed by U-Pb ages of zircon [J]. Quaternary Research, 2013, 80 (80): 545–551.
- [25] Licht A, Kapp P, Kapp P, *et al.* Eolian cannibalism: Re-worked loess and fluvial sediment as the main sources of the Chinese Loess Plateau [J]. GSA Bulletin, 2016, 128 (5–6): B31375.1.
- [26] 孙斌,郭正堂,尹秋珍,等. 西宁第四纪黄土—古土壤序列中的可溶盐、来源及环境意义 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (4): 649–656.
- [27] An F Y, Lai Z P, Liu X J, *et al.* Abnormal Rb/Sr ratio in lacustrine sediments of Qaidam Basin, NE Qinghai-Tibetan Plateau: A significant role of aeolian dust input [J]. Quaternary International, 2017, doi: 10.1016/j.quaint.2016.12.050.

Research Progress of the Lacustrine Strata Deflation for Western Qaidam Basin and Its Provenance Significance for Loess Plateau

LI Yong-guo¹, AN Fu-yuan^{2,3}, ZHANG Qi-xing¹, ZHAO Hong-ju⁴

(1. Key Laboratory of Hydrogeology, Geothermal Geology of Qinghai Province, Survey Institute Of Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology of Qinghai Province, Xining 810008, China; 2. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 3. Key Laboratory For Salt Lake Geology And Environment of Qinghai Province, Xining, 810008, China; 4. Qinghai Geological Survey Institute, Xining, 810008, China)

Abstract: Qaidam Basin is one of the most arid basins in the western China and dominates by the strong northwest wind, especially in winter and spring. Thousands kilometers thick lacustrine and fluvial sedimentary have been deposited in the basin since Cenozoic. However, initiation of the late Pliocene, it appeared the wind erosion in the western Qaidam Basin with the aridification of palaeoclimate and intensity of the tectonic deformation. The forming of palaeo-salt-crust and palaeo-yardangs indicated the deflation is rather drastic in later period. With the deteriorating of palaeoclimate and emerging of glacial periods since late Pleistocene, and strong wind sculpture the vast lacustrine sediments in western Qaidam Basin and then development of mega-yardangs landform. The thick of deflated strata and erosion rate in the basin are different, the most thickness reach to 3 kilometers and erosion rate is 1.1 mm/yr. So much deflated materials transportation contribute abundant dust to the downwind areas such as Dulan, Qinghai Lake, Xining area as well as Chinese Loess Plateau. Previous studies show that the Qaidam Basin is one of the most important source areas for aeolian deposit in Chinese Loess Plateau, this understanding is more and more accepted by Quaternary community.

Key words: Wind erosion; Lacustrine strata; Western Qaidam Basin; Provenance; Loess Plateau