柴达木盆地鸭湖地区水上雅丹地貌成因研究

毛晓长[1)],刘祥[2)],董颖[3)],拜永山[4)],徐亚东[2)],宋博文[5)]

1) 中国地质调查局,北京,100037; 2) 中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉,430074;
3) 中国地质环境监测院, 北京,100081;4) 青海省地质调查院,西宁,810012;
5) 中国地质大学(武汉)地质调查研究院,武汉,430074

内容提要: 本文通过对青海柴达木盆地鸭湖地区构成水上雅丹的地层序列和沉积相、地层形成时代、地层形成后演化为雅丹地貌的构造条件、气候条件和人为因素的研究,认为构成研究区水上雅丹的地层为中新世上油砂山组,所含介形虫组合指示其形成时代为中新世晚期;沉积相和孢粉组合分析揭示本区在中新世晚期为温暖干旱的气候下的古湖环境,接受湖相和湖泊三角洲前缘沉积;上新世在区域构造抬升和干旱化气候的双重作用下,古湖逐渐萎缩;更新世在极端干旱和强劲的季风环境中,被抬升到地表的上油沙山组上部地层在风蚀为主的外营力作用下形成雅丹;晚更新世末期—全新世由于末次间冰期的到来,气候转向温暖湿润,湖水再次入侵。近年人类活动改变了湖泊分布格局,导致湖泊淹没了部分陆地上的雅丹,呈现为奇特的水上雅丹地貌景观。

关键词:水上雅丹;成因;地貌演化;上油砂山组;柴达木盆地

柴达木盆地分布有亚洲最大的雅丹地貌群(kapp et al., 2011 ; Li Jiyan et al., 2016; Hu Chengqing et al., 2017),近年来调查发现在柴达木盆地中西部鸭湖地区发育有我国仅有的一处水上雅丹地貌(青海省重要地质遗迹调查成果报告❶),碧蓝的湖水,鬼斧神工般的雅丹地貌构成一幅天然画卷,与周边的盐湖、戈壁、盐壳一起形成了一条美丽而独特的风景线,具有很高的旅游价值和科普价值。通常的雅丹地貌都出露在干旱的沙漠、戈壁之中,其形成受沉积、构造、侵蚀、气候等多种因素的制约(牛清河等,2011;王帅等,2009;Ward et al., 1984; Gutiérrez-Elorza et al., 2002; Goudie, 2007; Al-Dousari et al.,2009; Abrahams et al.,1994),而鸭湖地区的雅丹非常奇特地出露在湖水之中,因此其成因演化备受社会公众和有关学者关注。目前柴达木盆地雅丹地貌研究较为薄弱,现有少量文献侧重于雅丹地貌的外部形态特征和风蚀作用研究(李继彦等,2011,2013;魏恺泓,2013 ; Hu Chengqing et al., 2017),对于雅丹地貌的物质基础(岩性、结构、沉积环境)、构造—气候响应和地貌形成过程等关注不够,而水上雅丹的成因尚未有学者进行专题研究。本文通过对鸭湖地区水上雅丹赋存地层实测剖面、沉积相、介形类与孢粉生物化石分析的基础上,确定了地层形成时代,研究恢复了古环境和古气候,并结合区域资料,阐述了该地区雅丹地貌演化与构造抬升、气候变迁、以及人类活动的关系,探讨了水上雅丹地貌的形成和演化历程。

1 鸭湖地区水上雅丹地貌特征与地质背景

鸭湖地区位于柴达木盆地中西部,西台吉乃尔湖、鸭湖、东台吉乃尔湖呈北西西—南东东向串珠分布,行政区划分隶属青海省海西蒙古族藏族自治州(图1)。该地区平均海拔在2700 m以上,地形起伏不大。

水上雅丹地貌主要出露在鸭湖的北部近湖岸一带。据2016年调查统计(青海省重要地质遗迹调查成果报告❶),鸭湖中的单体地貌有790个,加上近岸的部分总共有近千个。这些单体总体上按走向330°方向排列,与周围陆地上雅丹走向一致。平面上单体规模最大为1750 m×250 m、最小为3.43 m×1.6 m、平均大小在53 m×13 m左右,高从几米到一

注: 本文为中国地质调查局项目(编号: 121201004000150013, DD20160345, 121201014000150018)的成果。
收稿日期:2018-04-21;改回日期:2018-09-30;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.014
作者简介: 毛晓长,男,1979年生。博士, 教授级高级工程师, 从事全国基础地质调查业务管理和构造地质研究。通讯地址:100037,中国地质调查局。Email: xmaoteng@163.com。

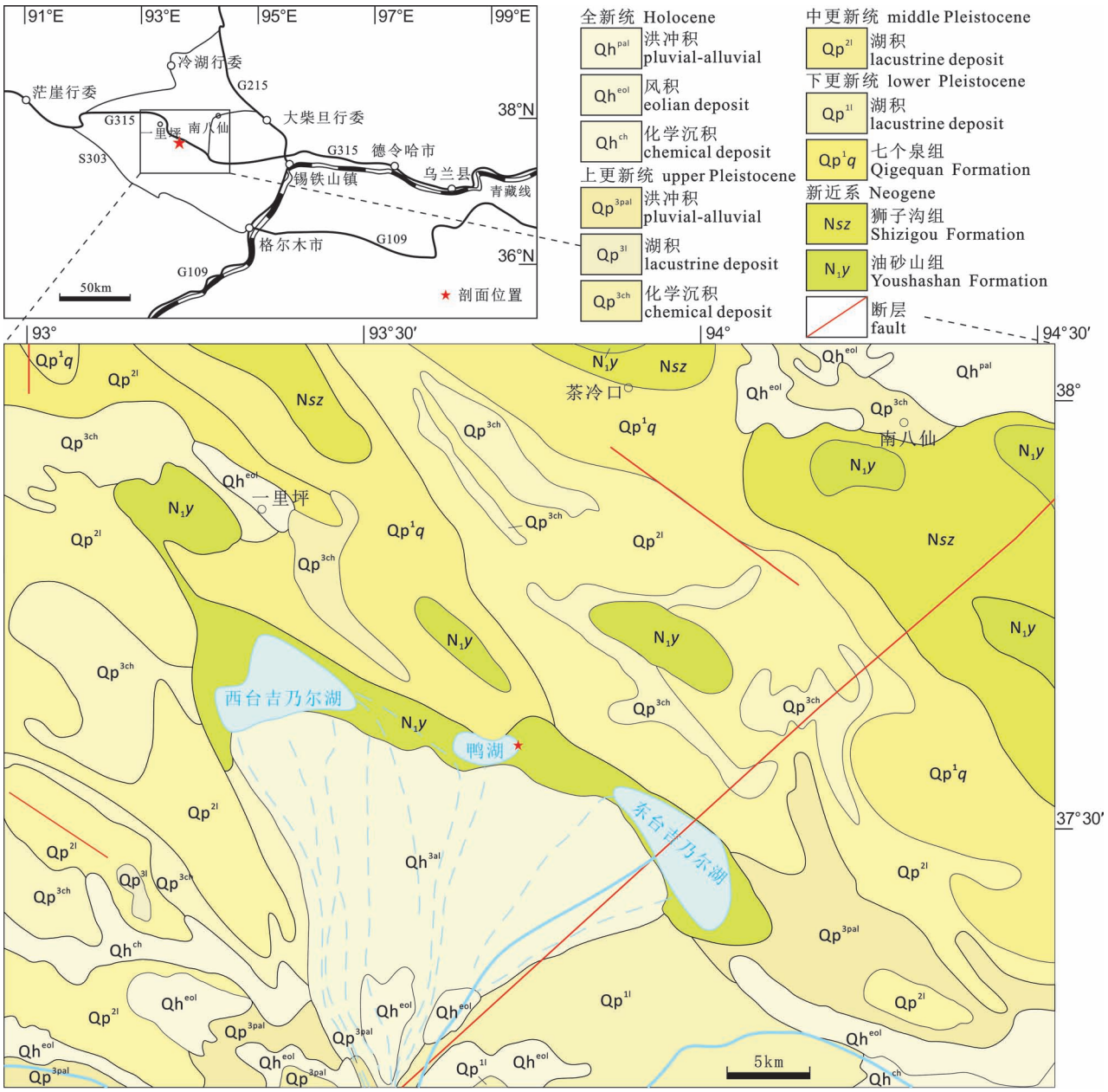

图 1 青海柴达木盆地鸭湖地区交通位置图及地质图(据王国灿等,2014,略有修改)

Fig. 1 Location and geological map of the Duck Lake, Qaidam Basin, Qinghai Province (modified after Wang Guocan et al., 2014&)

百余米不等。水上雅丹形态各异,既包括哈里默夫(1990)提出的柴达木盆地 8 个类型中的犬牙状、锥状、金字塔状、长垄状、鲸背状等形态,也分布有少量前人未提及的城墙状、柱状雅丹(图 2)。

鸭湖地区构造区划属于柴达木盆地中西部的一里坪坳陷,柴北缘块断带以西,柴西断坳区以东,三湖坳陷以北。出露的地层主要是新近纪以来的地层,由老到新依次为:中新世油砂山组(N_1y)、中新—上新世狮子沟组(Nsz)、早更新世七个泉组(Qp^1q)、早更新世湖积(Qp^{1l})、中更新世湖积(Qp^{2l})、上更新世化学沉积(Qp^{3ch})、湖积(Qp^{3l})、洪冲积(Qp^{3pal})以及全新世化学沉积(Qh^{ch})、风积(Qh^{eol})、洪冲积(Qh^{pal})(图 1)(王国灿等,2014)。新生代地层发生弱的褶皱变形,形成枢纽走向北西—南东向的背斜构造(戴俊生等,2003),平行和垂直于背斜轴向分别发育两组断层(图 1)。

图 2 柴达木盆地鸭湖地区水上雅丹地貌景观特征照片

Fig. 2 Photos of the landscape features of semi-submerged Yardang landform in the Duck Lake area, Qaidam Basin

(a)鲸背状雅丹;(b)城墙状雅丹;(c)柱状雅丹;(d)锥状雅丹

(a) Whale-backed Yardang; (b) Wall-shaped Yardang; (c) Columnar Yardang; (d) Conical Yardang

2　水上雅丹的地层组成、沉积相、形成时代与古环境

2.1　实测剖面地层与沉积相

本文选取鸭湖水上雅丹分布区水域北侧的一座风蚀残丘实测了剖面,进行了剖面分层与描述。剖面 GPS 坐标为 N:37°37′08.46″,E:93°45′56.15″。剖面总厚度 9.22 m,自下而上共划分了 10 层。采集了 8 件微体古生物样品和 3 件孢粉样品,经室内分析鉴定获得介形类 3 属 3 种(本文作者之一宋博文博士鉴定)、孢粉 36 科 45 属(本文作者之一徐亚东博士鉴定),除此以外还发现了一些腹足类化石。本文图 3 和图 4 展示了实测剖面的岩性岩相组成和获得的主要化石图像与鉴定结果。

该剖面出露地层主要为一套灰白色、灰色含砾砂岩、钙质粉砂岩与泥质粉砂岩(图 3)。通过对该剖面不同层位岩石的岩性、沉积构造综合分析,确定为湖泊三角洲前缘相沉积,可划分出水下分流河道与分流间湾两种沉积亚相(图 4)。水下分流河道是分支河道的水下延伸部分,岩性以含砾砂岩、细砂岩及粗粉砂岩为主,发育槽状交错层理、平行层理等沉积构造,反映了较强的水动力条件。分流间湾为水下分流河道之间的相对低洼的湖湾地区,与湖相连通,属于较为平静的低能沉积环境,岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩为主,发育水平层理、微波状层理等沉积构造。

2.2　化石组合及其形成时代与古环境

本次在实测剖面上获得介形类化石为驼背美星介 *Cyprinotus gibbus* F. Yang et Sun, 1988、意外湖花介 *Limnocythere inopinata* Baird, 1843 和布氏土星介 *Ilyocypris bradyi* Sars, 1890,这些介形类属种主要分布在我国中新世晚期地层中(张克信等,2013),介形类生物地层的区域对比显示该剖面地层形成时代为中新世晚期。*Ilyocypris* 一般认为较喜热,见于各

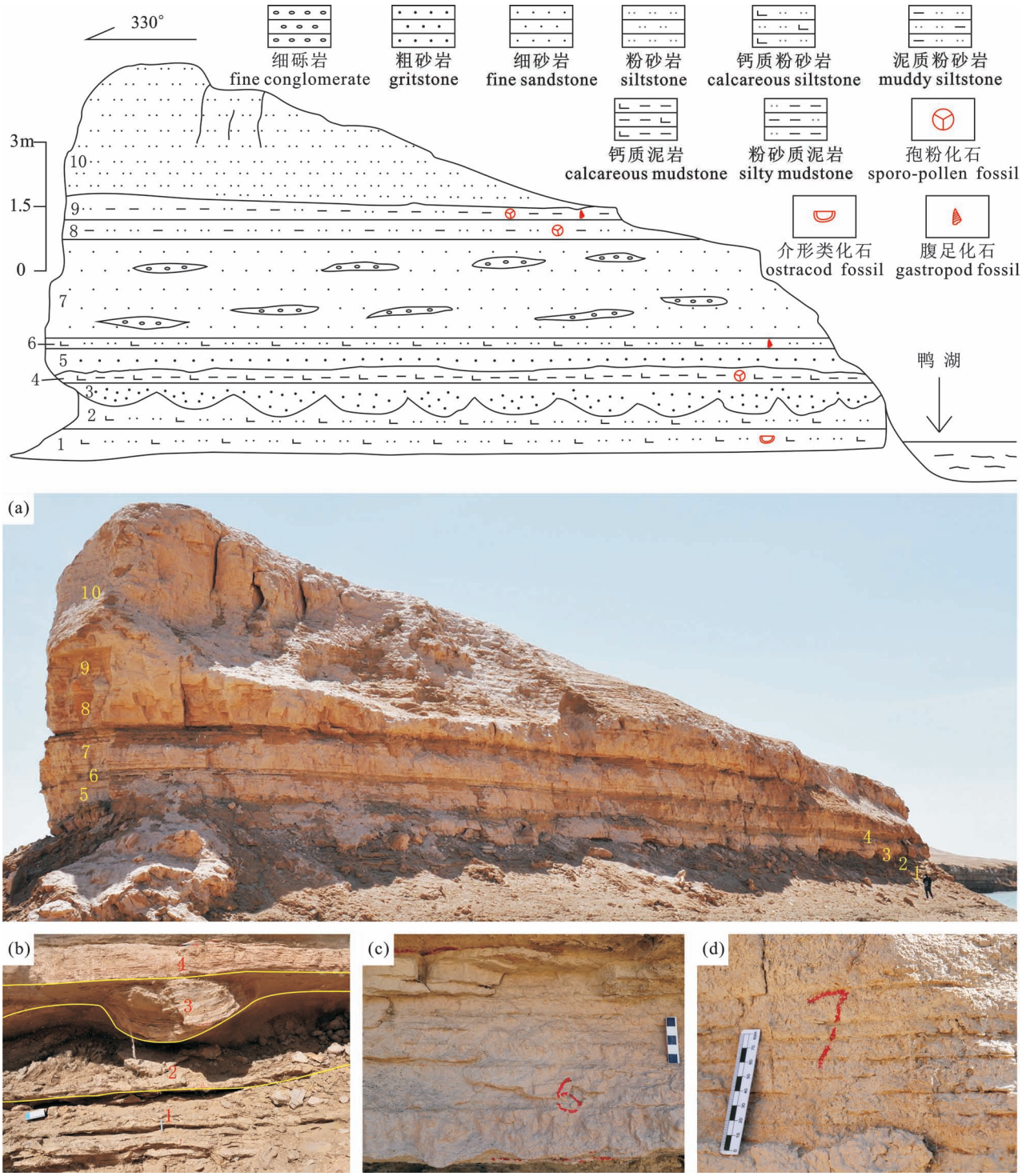

图 3 柴达木盆地鸭湖水上雅丹剖面示意图及露头照片

Fig. 3 Geological sectionand outcrop photos of Semi-submerged Yardang in the Duck Lake, Qaidam Basin

(a)风蚀残丘;(b)第 1~4 层(第 3 层槽状交错层理—第 4 层平行层理);(c)第 6 层平行层理;(d)第 7 层平行层理

(a) wind erosion monadnock; (b) Layer 1~4 (Layer 3 trough cross bedding —Layer 4 parallel bedding); (c) Layer 6 parallel bedding; (d) Layer 7 parallel bedding

种类型的淡水—少盐水水域中,适于浅水、低能量的流动性水体(Staplin et al. ,1963)。布氏土星介为广温性浅水种,较喜暖,为淡水河湖相种,多生活于流动性水体中(张虎才等,2008)。*Cyprinotus* 是喜热类

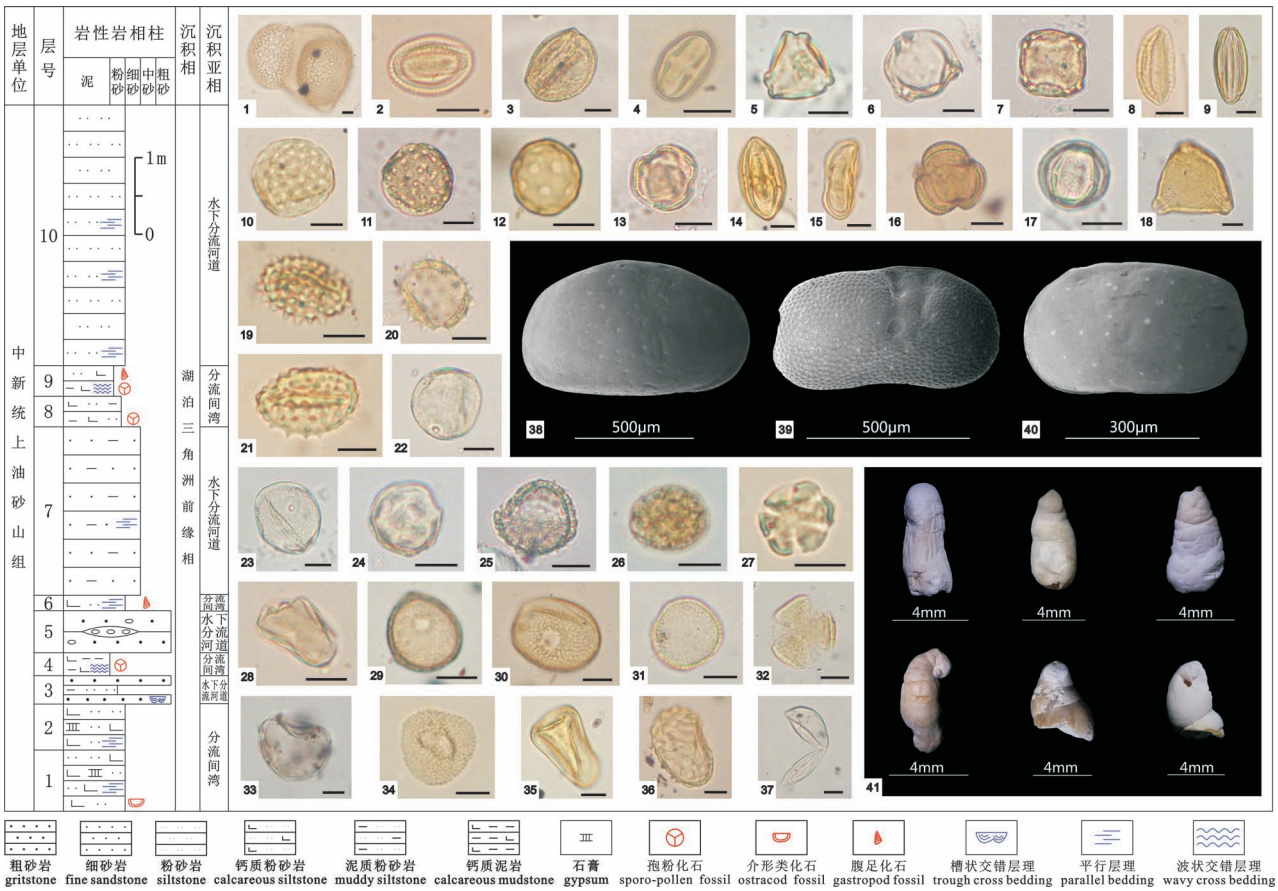

图 4 柴达木盆地鸭湖水上雅丹剖面岩性岩相柱状图及化石(孢粉化石照片的比例棒长均为 10μm)

Fig. 4 Lithology andlithofacies columnar section and fossils of Semi-submerged Yardang in Duck Lake, Qaidam Basin

1~37—孢粉化石:1—松属(*Pinus*),第 4 层;2—柳属(*Salix*),第 9 层;3—栎属(*Quercus*),第 8 层;4—栗属(*Castanea*),第 4 层;5—鼠李属(*Rhamnus*),第 9 层;6—桦木属(*Betula*),第 4 层;7—桤木属(*Alnus*),第 9 层;8,9—麻黄属(*Ephedra*),第 9 层;10~12—藜属(*Chenopodium*),第 9 层;13—柽柳属(*Tamarix*),第 9 层;14—白刺属(*Nitraria*),第 8 层;15—伞形科(Umbelliferae),第 9 层;16,17—蒿属(*Artemisia*),第 9 层;18—胡颓子属(*Elaeagnus*),第 9 层;19~21—紫菀属(*Aster*),第 8 层;22,23—禾本科(Gramineae),第 9 层;24—石竹属(*Dianthus*),第 9 层;25—十字花科(Cruciferae),第 8 层;26—蓼属(*Polygonum*),第 4 层;27—茜草属(*Rubia*),第 8 层;28—莎草属(*Cyperus*),第 9 层;29—黑三棱属(*Sparganium*),第 4 层;30—香蒲属(*Typha*),第 4 层;31—眼子菜属(*Potamogeton*),第 9 层;32—毛茛属(*Ranunculus*),第 9 层;33—水龙骨科(Polypodiaceae),第 4 层;34—石松属(*Lycopodium*),第 4 层;35—里白属(*Hiciopteris*),第 8 层;36—骨碎补科(Dvavlliaceae),第 8 层;37—杉科(Taxodiaceae),第 4 层。38~40—介形类化石:38—*Cyprinotus gibbus*,第 1 层;39—*Ilyocypris bradyi*,第 1 层;40—*Limnocythere inopinata*,第 1 层。41—腹足类化石,第 9 层

型,分布在南北年等温线+20℃的范围内,主要栖息于小型淡水—少盐水水体中,在柴达木盆地现代水域中未发现现生的美星介(青海石油管理局勘探开发研究院,1988)。*Limnocythere* 该属是一个广盐度的类型,*Limnocythere inopinata* 主要偏爱于盐度范围为 3‰~9‰的水体中(Holmes et al.,1999),即少盐水—中盐水水体。该种的现生种不能游泳,营底栖,主要生活在湖滨或浅水水域。盆地里 *Limnocythere* 化石往往产于具有微细层理的岩层中(青海石油管理局勘探开发研究院,1988)。对上述介形类属种的生存环境进行分析得知,该地层沉积时的水体为低能量、少盐度的活动性浅水水体,且气候较温暖。这一结论佐证了该套地层沉积环境为三角洲前缘的认识。

经室内分析处理和鉴定共获得孢粉化石 36 科 45 属,其中灌木和草本植物花粉丰富,乔木花粉较少,还有少量蕨类植物的孢子(图 4)。根据这些孢粉化石的属种组合特征,将该剖面自下而上划分了 2 个组合:孢粉组合Ⅰ:*Artemisia*— Compositae—*Ephedra*(0~5.42 m,1~8 层),以陆生草本和灌木植物花粉占绝对优势,主要是蒿属、菊科、麻黄属和藜科,还可见一定数量的禾本科、柽柳属、十字花科、蓼

属等;其次为乔木花粉,以阔叶类的栎属、柳属和针叶类的松属为主;水生草本植物花粉以香蒲属和黑三棱属较为常见;蕨类植物孢子含量少,主要为水龙骨科和石松属。孢粉组合Ⅱ:Chenopodiaceae—*Artemisia*— *Ephedra*(5.42~9.22 m,9~10 层),以陆生草本和灌木植物花粉占绝对优势,主要组成部分为藜科、蒿属、麻黄属和少量的石竹属、蔷薇科、禾本科、白刺属等;乔木花粉次之,以阔叶类的栎属、榆属和针叶类的松属为主;水生草本植物花粉较少,以香蒲属和眼子菜属为主;蕨类植物孢子含量极少,主要为水龙骨科。

根据前人的研究表明蒿属/藜科(A/C)的比值是比较有效的生物气候指标(El-Moslimany, 1990; Campo et al. ,1993)。当这两者之和在花粉组合中占优势时(>50%),蒿属/藜科(A/C)的比值可以作为干燥程度的一个指示参数(孙湘君等, 1994),一般认为荒漠区的 A/C 值<0.5,荒漠草原区为 0.5~1.2,草原区>1.0。鸭湖风蚀残丘剖面的 2 个孢粉组合均存在陆生草本植物和灌木植物占绝对优势,乔木植物次之,水生草本植物和蕨类植物稀少的特点,且蒿属和藜科为主要孢粉类型。因此,A/C 值的变化特征在一定程度上可以反映该地区的气候变化。

组合Ⅰ:孢粉组合中主要以蒿属、菊科等中、旱生草原典型类型,麻黄属等荒漠草原典型类型以及藜科等干旱荒漠典型类型占绝对优势,其中又以蒿属和菊科为主。还含有少量栎属、柳属、胡桃属以及松属等喜温分子,水生草本植物和蕨类植物较少。孢粉温度指数(T)(Ma Yuzhen et al., 2008)介于 7.68~10.15 之间,平均为 8.92;湿度指数(M)介于 0.06~0.11 之间,平均为 0.09。A/C 值较高,平均为 19.23。这一组合整体上反映了一种旱生草原的植被面貌,虽然 A/C 值较高,但由于这一组合的蒿属与藜科的含量不足 50%,因此 A/C 值高也并不能说明这一阶段的气候湿润,反之较低的湿度指数表示相对干旱的气候。相比于较少的云杉属、桦木属、桤木属等喜凉分子,含量较多的喜温分子反映了相对温和的气候。

组合Ⅱ:该组合中主要以藜科、麻黄属和蒿属占绝对优势,相比上一组合,陆生草本和灌木植物的含量增加,乔木和水生草本植物的含量减少,并且藜科与麻黄属等超旱生植物有较多的增加,蒿属相对减少。孢粉温度指数(T)为 10.18;湿度指数(M)为 0.06,A/C 值较低为 0.74。这一组合整体上反映了一种荒漠草原的植被面貌,湿度指数与 A/C 值的降低表示这一组合的气候较上一组合干旱程度增强;温度指数有了小幅度的提升,反映了一种相对温暖的气候。

研究区在中新世晚期的植被经历了旱生草原—荒漠草原的演化,整体上看中新世晚期一直处于干旱的气候条件下。藜科、麻黄属等超旱生分子逐渐取代蒿属、菊科等中、旱生分子,占据了优势,反映了不断增强的干旱化。

3 鸭湖地区水上雅丹成因和演化

鸭湖地区水上雅丹的形态与周边陆地上分布的雅丹是协调一致的,说明水中这些雅丹是柴达木中西部大规模雅丹的组成部分,为干旱环境下形成风蚀地貌,之后被湖水侵入而形成了水上雅丹地貌。因此本文将研究重点聚焦在雅丹形成过程、雅丹形态多样性的控制因素、湖水侵入机制和时代三个方面,综合考虑构造—沉积—气候—地貌协同演化以及人类活动影响,探讨水上雅丹形成发育模式。

3.1 区域构造影响

柴达木盆地在中更新世以前为统一的大湖(朱允铸等,1989; 何照等,2016)。区域构造对雅丹形成的影响主要体现在两个方面:其一是构造抬升及由此引起的气候干旱,使研究区经历了从湖到陆的变迁,为雅丹发育奠定基本条件;其二是褶皱、断裂以及地层的组成、结构对雅丹的初始发育和几何学特征的制约。

新生代印度与欧亚大陆碰撞的远程效应使得柴达木盆地遭受了持续的挤压变形,整体表现为昆仑山和祁连山对冲挤压,阿尔金左行走滑断裂进行调节的动力背景。柴达木盆地周缘在古新世—早始新世(65~50 Ma)已经有挤压响应(Yin An et al., 2008);42.8~40.5 Ma 研究区经历了第一次快速挤压缩短事件(Zhou Jianxun, 2006),形成盆地内部 NW—SE 走向褶皱和逆冲断裂;3.6~2.6 Ma,柴达木盆地北缘和东缘山系的抬升,使盆地内部气候向极干旱转变(Yin An et al., 2008);自 2.8 Ma 年以来,柴达木盆地经历第二次快速挤压缩短事件,缩短量达 30%~40%(Wang Erchie et al., 2006; Zhang Weilin et al., 2013; Zhou Jianxun et al., 2006),加剧了系列 NW—SE 向褶皱和逆冲断裂生长,不断给地表带来易侵蚀物质,为风蚀作用提供了大量的物料,促进了侵蚀过程的推进和雅丹发育(kapp et al., 2011)。鸭湖地区位于盆地内部,变形对其产生显

著影响的时间约为 2.6 Ma,受 NE、近 NS 向复合挤压应力作用影响,形成了极有规律的短轴背斜(水下穹窿),盆地内部产生了有利于蒸发岩沉积的闭合洼地,同时干旱化加剧,部分区域露出水面接受侵蚀,并在 2.4 Ma 出现了初始雅丹(古雅丹),意味着湖盆的进一步浅化和更多陆地的暴露(Heermance et al., 2013; 何照等,2016)。中更新世时期发生的"昆仑—黄河运动",使柴达木盆地同处一个基准面之上的古近纪盆地也被抬升到一定高度,奠定了目前地貌总体格局,研究区演变为皱褶构造间隔的次级成盐盆地,到更新世晚期演化成次级小盐湖,彼此完全分离,陆地大面积出露,侵蚀作用加剧(何照等,2016),具备了雅丹广泛发育的基础条件。

研究区褶皱的形态指示为近东西向与近南北向叠加的穹窿状褶皱,遥感图像可清晰解译出区域上平行于背斜轴向的左行走滑断裂和垂直于背斜轴向的右行走滑断裂(图 5a),两组断裂均切割雅丹地貌,推测为全新世活动断裂。褶皱、断裂,以及地层的组成和结构对雅丹的初始发育、几何学特征和保存现状具有重要制约作用。

(1) 暴雨形成的洪流沿着早期挤压形成的北西—南东向断裂缝侵蚀,把砂泥岩构成的高地侵蚀出万千条沟谷,为雅丹的初始发育奠定了基础。

(2) 穹窿状褶皱不同部位的地层产状与风向控

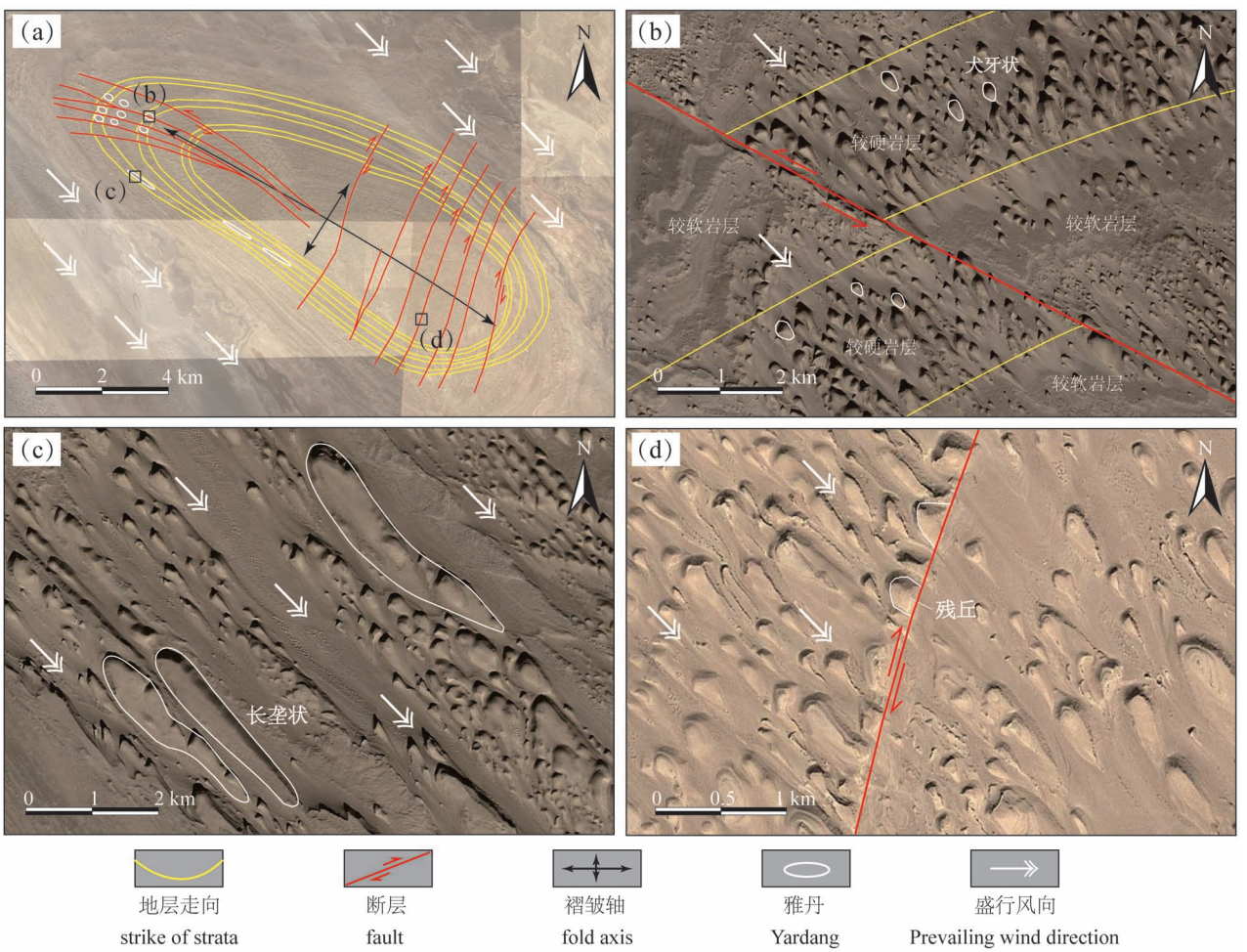

图 5 鸭湖北侧背斜地层和构造对雅丹几何学形态的控制

Fig. 5 The control of the Yardang geometry by anticline strata and structure in the northern side of the Duck Lake

(a)地质构造对雅丹形态影响模式图。黑色矩形代表 b、c、d 在背斜中的位置。(b)背斜迎风区:软硬层交替,发育左行走滑断裂,风向近垂直于地层走向。(c)背斜翼部:风向近平行于地层走向。(d)背斜枢纽区:发育右行走滑断裂

(a) Pattern of influence of geological structure on Yardang morphology. The black rectangle represents the position of b, c and d in the anticline. (b) Anticline windward area: Alternates the soft and hard layer, developing the left lateral fracture, and the wind direction is perpendicular to the direction of strata. (c) Flank of anticline: The wind direction is near parallel to the direction of strata. (d) Anticlinal hinge area: Developing the right lateral fracture

制了雅丹的几何学特征。当地层走向与盛行风有较大交角,或当倾角较大出露地层宽度较小时多形成长宽比小的雅丹,如犬牙状、锥状雅丹(图 5b);此外,背斜核部地层相对古老、固结程度好,加上坡度和高差大,所经受的侵蚀过程复杂,除风蚀外还有物质坡移、径流侵蚀等,也多形成长宽比小的雅丹。而背斜两翼控制的地层走向与风向平行,更易形成长宽比较大的长垄状雅丹(图 5c)。

(3) 该套地层中以砂岩为主的岩性抗侵蚀能力较强,表现为硬层,形成的雅丹更高大,保存形态更完整;反之泥岩或者泥质粉砂岩等较软地层上形成的雅丹规模小,容易受侵蚀消亡,或是形成沟谷(图 5b、图 5c)。

(4) 区域上左行走滑断裂和右行走滑断裂对早先形成的雅丹进行了局部的改造,造成雅丹区域整体错动(图 5b),或者切割雅丹改变其几何形态,产生城墙状、柱状等形态不完整的残丘(图 5d)。

3.2 气候条件控制

气候的变化影响着环境中的各个要素,与地貌的形成显示出明显的响应关系。鸭湖地区从中新世晚期以来总体上经历两次大的气候演变过程,这两次气候变化分别在雅丹的形成和湖水的入侵(水上雅丹的形成)过程中起到不可替代的作用。

第一次是中新世晚期至更新世末期的持续干旱化,尽管中间伴随有小尺度的湿热-干冷波动,但总体趋于干旱。中新世晚期被古湖淹没,沉积时的水体为低能量、少盐度的活动性浅水水体,植被经历了旱生草原—荒漠草原的演化,整体处于干旱气候条件下;自上新世开始研究区出现仅在高浓度盐湖环境生活的厚骨鱼化石,经历向后期波动性干旱强化的过程(方小敏等,2008 ; Meemann Chang et al., 2008)。3.0~2.6 Ma,与北半球冰期同步,研究区稳定同位素出现极端变化,耐旱植物花粉含量与盐度指标均呈现明显长期增加趋势,气候快速向更干旱方向发展,湖泊沉积物地表暴露和侵蚀更加广泛,至更新世早期湖泊沉积物地表暴露和侵蚀已广泛发生(方小敏等,2008; Chang Meemann et al., 2008; Heermance et al., 2013)。中更新世之后大部分山地进入冰冻圈,湖盆变干萎缩,被逐渐分割形成众多次级湖盆。1.2 Ma 后,罕见的极端气候波动使得柴达木盆地一直保持着干旱的气候,湖盆不断收缩趋于干涸,加速了在干冷冰期的风蚀活动(Heermance et al., 2013),现代东亚季风大约在此之后定型(王乃昂,1994)。柴达木盆地雅丹地貌是一种典型的风蚀地貌 (McCauley et al., 1977; Breed et al., 1989; Brookes, 2001; Ritley, 2004; Goudie, 2007; Panah et al., 2007; Al-Dousari et al., 2009),因此东亚季风的形成对雅丹地貌发展演化至关重要。即使在间冰期,由于降雨的缺乏和植被的稀少,风力作用一直是盆地内最重要的地貌营力。据 Kapp 等(2011)计算,冰期和亚冰期柴达木盆地西部风蚀速率> 0.12~1.1 mm /a,而此时陆地已经广泛出露,强劲的东亚季风从阿尔金山的低洼区中贯穿进入,从北西方向持续风蚀,上覆地层不断被剥蚀,中新世沉积的上油砂山组逐渐形成与常年主风向一致的集中连片分布的雅丹。结合区域资料分析,晚更新湖相地层由于风蚀作用广泛出露于地表,推测鸭湖地区现代雅丹地貌形成是在晚更新世(Kapp et al., 2011)。

第二次是从晚更新世末期—全新世总体变暖过程。经历过末次冰期的柴达木盆地的东亚季风向北移动,气候开始向温湿转换(李双,2011; Thompson et al., 2005)。气候变暖导致南部昆仑山的冰川融化汇聚形成那陵格勒河向北汇入柴达木盆地。根据常秋芳(2017)对那陵格勒河中游四级阶地 OSL 结果,T4 和 T1 分别形成于 13.1 ka 和 7.5 ka,那陵格勒河在此期间先后形成四期冲积扇不断向北推进,最新形成的冲积扇前缘受到了由早一中更新统组成的台吉乃尔背斜的阻挡,形成了东、西台吉乃尔湖和鸭湖在内的扇前湖(朱允铸等,1989)。这些湖泊均为尾闾湖,其面积变化主要受控于那陵格勒河地表径流。20 世纪 80 年代中后期以来,全球气候变化大背景下,整个柴达木盆地气候向暖湿转型,气温升高导致冰雪融水增多、降水量显著增加及蒸散量减少,那陵格勒河平均年径流量达 10.34×10^8 m^3(李林等,2015;戴升等,2013),大量河水汇入鸭湖地区,导致湖泊面积增大和水位上升,成为鸭湖地区形成大规模水上雅丹的必要条件。该时期风沙通量和风蚀作用有明显的减弱(Thompson et al., 1989)。此外,根据气象站数据,距离鸭湖最近同在盆地内部的察尔汗盐湖雅丹地貌区年平均风速为 3.7 m/s,起沙风(>5 m/s)占全年风速记录的 22.93%(李继彦等,2013);大柴旦 1987~2010 年平均沙尘暴日数仅有 0.3 天,且整个柴达木盆地沙尘暴减少趋势明显(戴升等,2013)。表明研究区当前并未遭受严重的风蚀,加上雅丹表面往往覆盖有分米级别的盐壳保护(kapp et al., 2011; Heermance et al., 2013),总体上鸭湖地区水上雅丹处于发育的不活跃期。

3.3　人类活动响应

鸭湖地区湖泊为内陆湖,除了对气候高度敏感外,对人类活动亦具有很高的敏感性。研究区人烟稀少,近几十年来人类活动主要是建坝阻隔河湖连通、开采卤水、建设人工盐田、排放老卤等盐湖开发行为,导致了盆地内盐湖的空间格局、功能、面积的变化,而不同时期湖水的空间分布和面积变化控制了水上雅丹的分布。根据不同时段卫星图像对比分析和段水强(2018)资料,人类对该地区盐湖开发始于 1998 年,但在 2003 年前仅在东台吉乃尔湖东缘进行小规模开采,并未造成重大影响,那棱格勒河多注入东、西台吉乃尔湖,很少有水能进入一里坪,鸭湖仅是一个面积约为 6 km^2 的小湖泊,区域上未形成规模化水上雅丹(图 6a)。2003 年,某企业在西台吉乃尔湖区南部、东部修建阻水堤,将河水经苦水沟排向一里坪,此后的几年间,西台吉乃尔湖仅在汛期有水。2008 年另一企业在东台吉乃尔湖修筑围堤 33 km,完全封堵了入湖通道,东、西台吉乃尔湖逐渐向干盐湖转化,上游来水一部分滞留于鸭湖,一部分被排往下游一里坪湖,2010 年一里坪湖面积达 313 km^2,一跃成为盆地内最大的湖泊,在一里坪湖北部、鸭湖北部形成较大规模的水上雅丹(图 6b)。2013 年,某大型企业修建阻水坝封堵了排往一里坪湖的河道,致使东、西台吉乃尔湖和一里坪湖 3 处盐湖于 2015 年均成为干盐湖,一里坪湖北部水上雅丹消失。河水滞留于鸭湖和苦水沟,鸭湖迅速成为该区域最大的湖泊,面积达 288 km^2(青海省重要地质遗迹调查成果报告[1])。鸭湖东岸和西岸为人工堤坝所限制,水域更多向南北扩张,致使鸭湖北侧背斜南翼部分陆上雅丹、鸭湖南侧洪积扇体上残留的雅丹浸泡于水中,呈现为当前规模宏大的鸭湖水上雅丹景观(图 6c)。同时由于排往一里坪湖的河道被阻,在苦水沟下游西台吉乃尔湖西北侧形成新的水域,也形成了一定规模的水上雅丹(图 6c)。

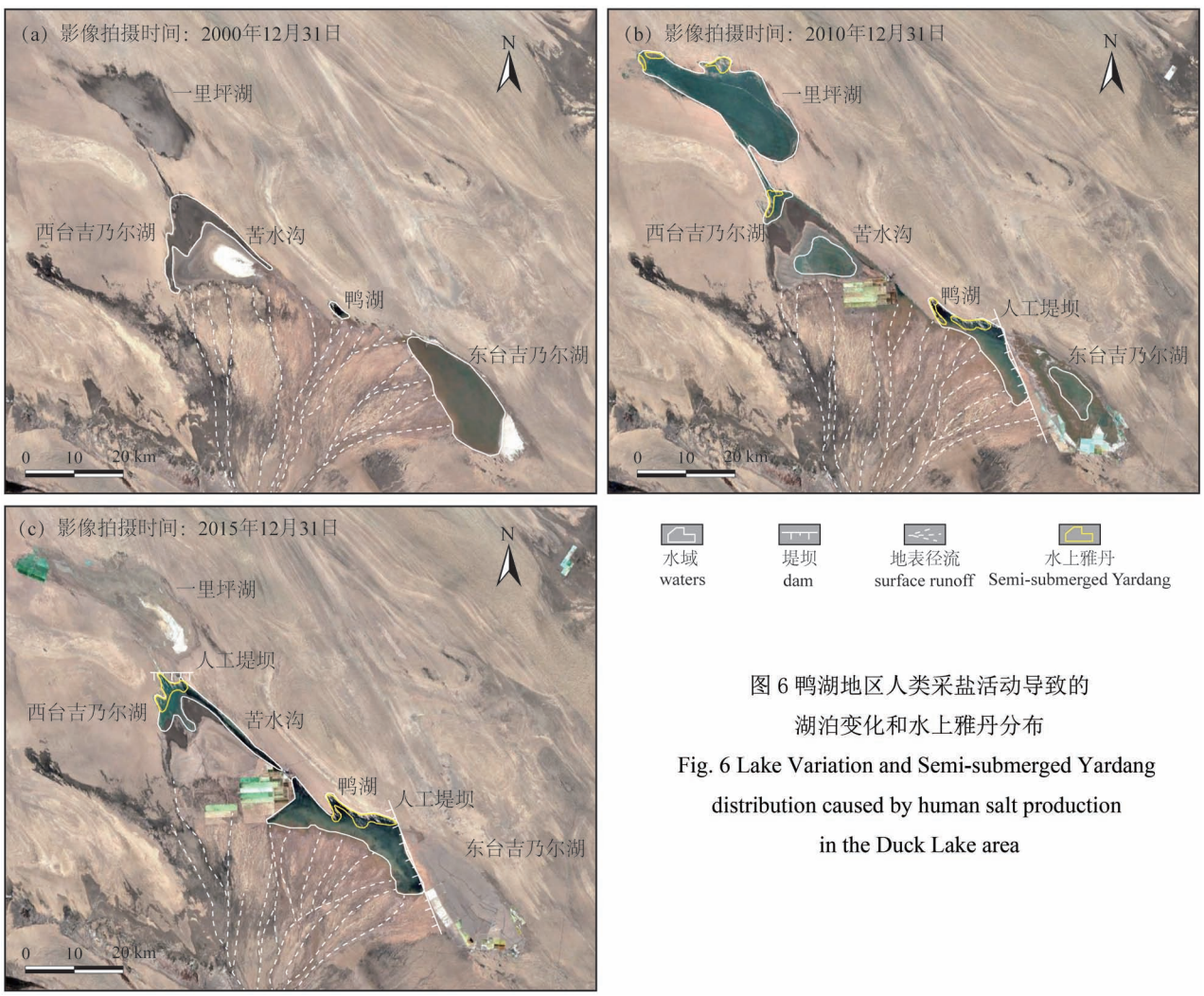

图 6 鸭湖地区人类采盐活动导致的湖泊变化和水上雅丹分布

Fig. 6 Lake Variation and Semi-submerged Yardang distribution caused by human salt production in the Duck Lake area

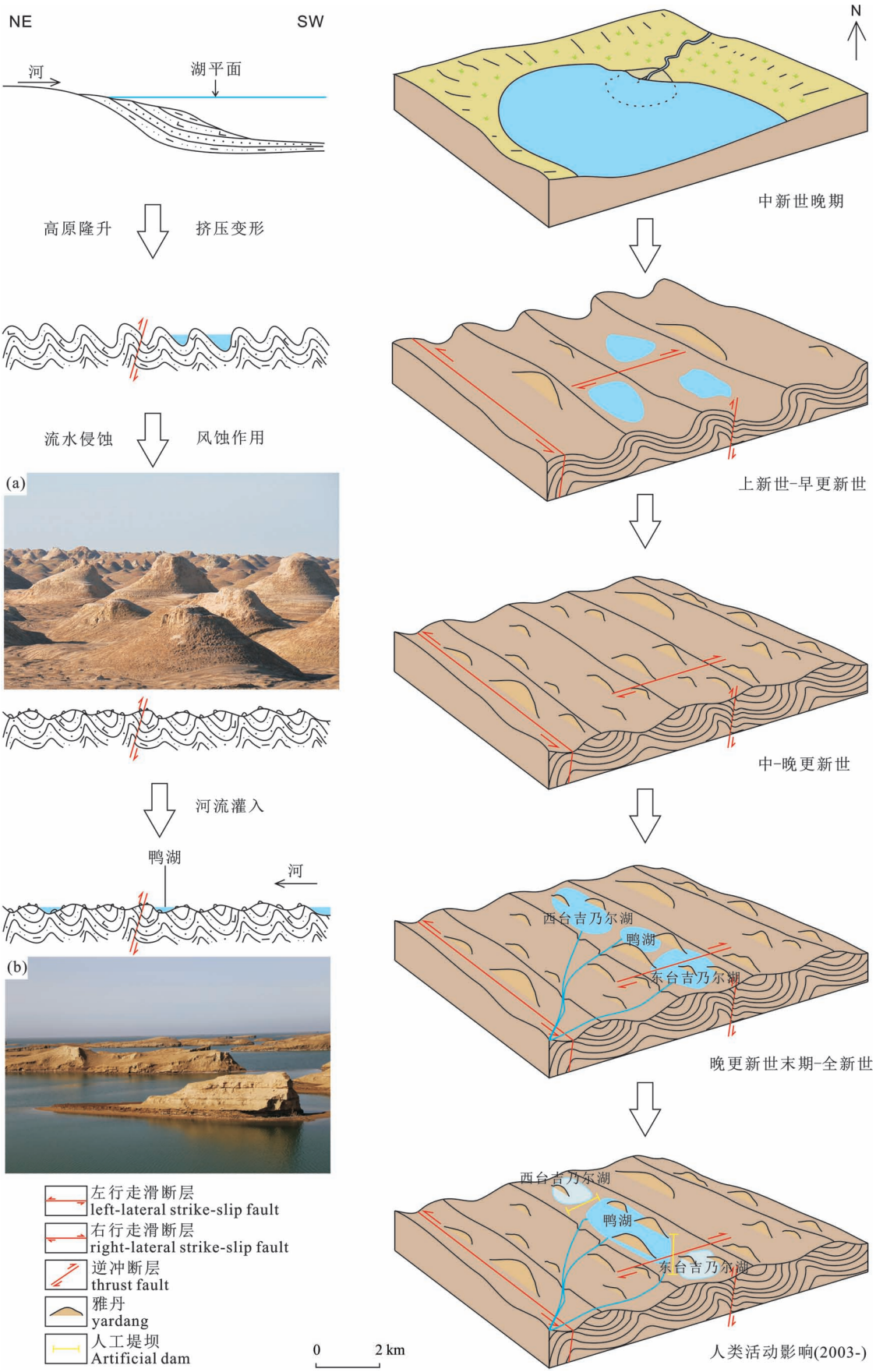
NE
SW
河
湖平面
高原隆升
挤压变形
流水侵蚀
风蚀作用
(a)
河流灌入
鸭湖
河
(b)
左行走滑断层
left-lateral strike-slip fault
右行走滑断层
right-lateral strike-slip fault
逆冲断层
thrust fault
雅丹
yardang
人工堤坝
Artificial dam
0
2 km
N
中新世晚期
上新世-早更新世
中-晚更新世
西台吉乃尔湖
鸭湖
东台吉乃尔湖
晚更新世末期-全新世
西台吉乃尔湖
鸭湖
东台吉乃尔湖
人类活动影响(2003-)

图 7 青海柴达木盆地鸭湖地区水上雅丹地貌形成演化图

Fig. 7 The evolution diagram of waterborne Yardang landform in the Duck Lake area, Qaidam Basin, Qinghai Province

(a)雅丹地貌;(b)水上雅丹地貌

(a) Yardang landform; (b) waterborne Yardang landform

3.4 水上雅丹地貌演化过程

综上所述,鸭湖地区水上雅丹地貌形成可大致划分为 5 个阶段(图 7)。

(1)古湖演化阶段(中新世):中新世研究区为古湖,气候相对温暖干旱,一直接受着来自北东方向赛什腾山的碎屑物质的沉积(林洪,2014),形成了一套湖相和湖泊三角洲前缘相的碎屑沉积(张克信等, 2013;季军良等, 2013;Zhang K X et al., 2013)。

(2)雅丹发育基础形成阶段(上新世—早更新世):青藏高原隆升,研究区受挤压变形产生北西向褶皱,气候愈加干旱,古湖逐渐萎缩,形成皱褶构造间隔的次级成盐盆地,失去了碎屑物质的供应。在一些隆起区开始发育古雅丹。

(3)雅丹形成阶段(中—晚更新世):现代季风—干旱环境形成,湖盆不断收缩趋于干涸,湖泊沉积物广泛暴露地表,在流水侵蚀和强劲的东亚季风作用下,上覆地层不断被剥蚀,中新世沉积的上油砂山组逐渐形成现今所见雅丹地貌。

(4)湖水入侵阶段(晚更新世末期—全新世):气候转向温暖湿润,源自南部冰川融水的陵格勒河自南向北流,汇入之前已干涸的东、西台吉乃尔湖和鸭湖,湖泊周缘部分雅丹浸泡于水中,形成水上雅丹。

(5)人类活动影响阶段(2003~):人类大规模采盐活动改变该区域湖泊格局和面积,导致水上雅丹分布的变化。自 2010 年起,由于人类采盐活动阻断了流往东、西台吉乃尔湖的河道,河水集中汇入鸭湖和苦水沟,致使原先陆地上大量雅丹浸泡在水中,呈现为目前奇特壮观的鸭湖地区水上雅丹景观。

水上雅丹未来的发展演化,如果仅从自然演变的结果分析,其一是水上雅丹底部遭受水浸泡,砂泥岩粘结系数将会降低,加剧差异性风化作用,加上湖水波浪作用的结果,长期持续将导致重力坍塌, 加速雅丹衰亡。目前水上雅丹水位附近目测已有一定的侵蚀改造(图 2)。其二是由于洪积扇不断推进,沉积物的不断堆积,将导致鸭湖地区水位的不断抬升,最终将造成河流改道,流向新的低洼地区,形成新的湖泊和水上雅丹分布区。冲积扇同时会加剧对雅丹的侵蚀和破坏(McCauley et al., 1977; Goudie, 2007; Li Jiyan,2016)。从遥感图像可以看出,那陵格勒河河水塑造出了面积巨大向北倾斜的四期洪积扇体,这些扇体涉及区域的雅丹地貌形态大多已破坏殆尽(图 6)。

4 结论

(1)柴达木盆地鸭湖地区构成水上雅丹地貌的地层为油砂山组上部,形成时代为中新世晚期;沉积相分析为湖泊沉积组合;介形类生态分析揭示其为少盐—中盐度的古湖;孢粉组合分析揭示其气候为温暖干旱。

(2)中-晚更新世在极端干旱和强劲的季风环境中,在风蚀为主的外营力作用下,上覆地层不断被剥蚀,中新世沉积的上油砂山组逐渐形成现今所见雅丹地貌。雅丹形态多样性则受北西—南东向褶皱、地层产状和岩性、平行和垂直于背斜轴向的两组走滑断裂、北西向季风多种因素制约。

(3)晚更新世末期—全新世湖水再度侵入,自 2003 年起人类采盐活动导致湖泊格局和面积变化。2010 年流往东、西台吉乃尔湖的河道被采盐企业阻断,河水滞留于一里坪湖和鸭湖,在两个湖泊北侧形成较大规模水上雅丹。2015 年东、西台吉乃尔湖和一里坪湖均成为干盐湖,河水集中汇入鸭湖和苦水沟使其面积急剧增大,致使原先陆地上更多的雅丹浸泡在水中,形成当前所见鸭湖地区水上雅丹景观。

致谢:本文研究得到中国地质大学(武汉)张克信教授大力协助与指导,中国地质科学院地质力学所胡健民研究员、中国地震局地壳应力研究所李德文研究员提出了有益修改意见,在此深表感谢。

注　释 / Notes

❶ 青海省地质调查院. 2017.青海省重要地质遗迹调查成果报告.

❷ 青海省地质矿产局. 1991.青海省区域地质志.

参　考　文　献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

常秋芳. 2017. 青藏高原风成沉积和那陵格勒河流阶地释光年代学

及环境意义. 导师:赖忠平,韩凤清.中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所)博士学位论文:1~120.

戴俊生,叶兴树,汤良杰,金之钧,邵文斌,胡勇,张兵山. 2003. 柴达木盆地构造分区及其油气远景. 地质科学, 38(3):291~296.

戴升,申红艳,李林,王振宇,肖建设. 2013. 柴达木盆地气候由暖干向暖湿转型的变化特征分析.高原气象, 32(1):211~220.

段水强. 2018. 1976~2015 年柴达木盆地湖泊演变及其对气候变化和人类活动的响应. 湖泊科学, 30(1):256~265.

方小敏,吴福莉,韩文霞,王亚东,张玺正,张伟林. 2008. 上新世—第四纪亚洲内陆干旱化过程——柴达木中部鸭湖剖面孢粉和盐类化学指标证据. 第四纪研究, 28(5):874~882.

哈里默夫,杨有林. 1990.中央亚细亚的八种雅丹地貌类型.中国沙漠,10(1):1~12.

何照,张西营,黄聿铭,马海州,李永寿,苗卫良,于晨光. 2016. 柴达木盆地北部新生代构造运动及其对盐湖演化的影响.盐湖研究, 24(1):1~7.

季军良,江尚松,张克信,陈奋宁,王国灿,杨永锋,骆满生.2013. 青藏高原上新世构造岩相古地理.地质通报,32(1):19~30.

李继彦,董治宝.2011. 柴达木盆地东南部雅丹地貌形态参数研究. 水土保持通报, 31(4):122~125.

李继彦,董治宝,李恩菊,杨宁宁. 2013. 察尔汗盐湖雅丹地貌区风况分析. 中国沙漠, 33(5):1293~1298.

李林,申红艳,李红梅,肖建设. 2015. 柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究. 自然资源学报, 30(4):641~650.

李双.2011. 柴达木盆地尕海湖沉积岩芯记录的全新世气候环境变化.导师:张家武. 兰州大学硕士学位论文:1~55.

林洪.2014. 柴达木盆地北缘鄂博梁地区古—新近系物源分析与沉积相研究. 导师:李凤杰. 成都理工大学硕士学位论文:1~63.

牛清河,屈建军,李孝泽,董光荣,张克存,韩庆杰.2011. 雅丹地貌研究评述与展望. 地球科学进展, 26(5):516~527.

青海石油管理局勘探开发研究院. 1988. 柴达木盆地第三纪介形类动物群. 南京:南京大学出版社.

孙湘君,杜乃秋,翁成郁,林瑞芬,卫克勤. 1994. 新疆玛纳斯湖盆周围近 14000 年以来的古植被古环境. 第四纪研究, 14(3):239~248.

王国灿,张克信,向树元,王岸,曹凯,等. 2014. 青藏高原及邻区新生代地质图及说明书(1:1500000).武汉:中国地质大学出版社:1~166.

王帅,哈斯. 2009. 风蚀地貌形态与过程研究进展. 地球科学与环境学报, 31(1):100~105.

魏恺泓. 2013. 开特米里克矿区雅丹地貌形成演化模式及形态差异研究. 科学技术与工程, 13(33):9908~9912.

张虎才,王强,彭金兰,陈光杰. 2008. 柴达木察尔汗盐湖贝壳堤剖面介形类组合及其环境意义. 第四纪研究,28(1):103~111.

张克信,王国灿,骆满生,季军良,徐亚东,宋博文,等. 2013. 青藏高原及邻区新生代构造—岩相古地理图及说明书(1:3000000) . 北京:地质出版社.

朱允铸,李文生,吴必豪,刘成林. 1989. 青海省柴达木盆地一里坪和东、西台吉乃尔湖地质新认识. 地质论评,35(6):558~565.

Abrahams A D, Parsons A. 1994. Geomorphology of Desert Environments. Geographical Journal: 3~7.

Al-Dousari A M, Al-Elaj M, Al-Enezi E, Al-Shareeda A. 2009. Origin and characteristics of yardangs in the Um Al-Rimam depressions (N Kuwait). Geomorphology, 104(3~4):93~104.

Breed C S, McCauley J F, Whitney M I, Thomas D S G. 1989. Wind erosion forms. Arid Zone Geomorphology. Belhaven Press, London, 284~307.

Breed C S, McCauley J F, Whitney M I, Thomas D S G. 1997. Wind erosion in drylands. Arid Zone Geomorphology: Process, form and Change in Drylands. Chichester: John Wiley, 453~460.

Brookes I A. 2001. Aeolian erosional lineations in the Libyan Desert, Dakhla Region, Egypt. Geomorphology, 39 (3 - 4):189~209.

Campo E V, Gasse F. 1993. Pollen- and Diatom-Inferred Climatic and Hydrological Changes in Sumxi Co Basin (Western Tibet) since 13, 000 yr B.P. Quaternary Research, 39(3):300~313.

Chang Meemann, Wang Xiaoming, Liu Huanzhang, Miao Desui, Zhao Quanhong, Wu Guoxuan, Liu Juan, Li Qiang, Sun Zhencheng and Wang Ning. 2008. Extraordinarily Thick-Boned Fish Linked to the Aridification of the Qaidam Basin (Northern Tibetan Plateau). Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(36):13246~13251.

Chang Qiufang. 2017&. Optically Stimulated Luminescence chronology and palaeoenvironmental implications of Aeolian sediment and the Nalinggele river terraces in the Tibetan Plateau. Instructors: Lai Zhongping, Han Fengqing. University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences) PhD thesis: 1~120.

Dai Junsheng, Ye Xingshu, Tang Liangjie, Jin Zhijun, Shao Wenbin, Hu Yong, Zhang Bingshan. 2003&. Tectonic units and oil—gas potential of the Qaidam Basin. Chinese Journal of Geology, 38(3): 291~296.

Dai Sheng, Shen Hongyan, Li Lin, Wang Zhenyu, Xiao Jianshe. 2013&. Analysis on climatic transition characteristic from warm-dry to warm-wet in Tsaidam Basin. Plateau Meteorology, 32(1):211~220.

Duan Shuiqiang. 2018&. Lake evolution in the Qaidam Basin during 1976 ~ 2015 and their changes in response to climate and anthropogenic factors. Journal of Lake Sciences, 30(1):256~265.

El-Moslimany A P. 1990. Ecological significance of common nonarboreal pollen: examples from drylands of the Middle East. Review of Palaeobotany & Palynology, 64(1):343~350.

Fang Xiaomin, Wu Fuli, Han Wenxia, Wang Yadong, Zhang Yizheng, Zhang Weilin. 2008&. Plio—Pleistocene drying process of Asian inland——sporopollen and salinity records from Yahu Section in the central Qaidam Basin. Quaternary Sciences, 28(5):874~882.

Goudie A S. 2007. Mega-yardangs: a global analysis. Geography Compass, 1(1):65~81.

Gutiérrez-Elorza M, Desir G, Gutiérrez-Santolalla F. 2002. Yardangs in these miarid central sector of the Ebro Depression (NESpain). Geomorphology, 44(1/2):155~170.

Heermance R V, Pullen A, Kapp P, Garzione C N, Bogue S, Ding L, Song P. 2013. Climatic and tectonic controls on sedimentation and erosion during the Pliocene—Quaternary in the Qaidam Basin (China). Geological Society of America Bulletin, 125(5~6):833~856.

He Zhao, Zhang Xiying, Huang Yuming, Ma Haizhou, Li Yongshou, Miao Weiliang, Yu Chenguang. 2016&. Cenozoic tectonic movements of the north Qaidam Basin and their effects on the evolution of salt lakes. Journal of Salt Lake Research, 24(1):1~7.

Holmes J A, Allen M J, Street-Perrott F A, Ivanovich M, Perrott R A, Waller M P. 1999. Late Holocene palaeolimnology of Bal Lake, Northern Nigeria, a multidisciplinary study. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 148(1~3):169~185.

Hu Chengqing, Chen Ninghua, Kapp P, Chen Jianyu, Xiao Ancheng, Zhao Yanhui. 2017. Yardang geometries in the Qaidam Basin and their controlling factors. Geomorphology, 299:142~151.

Ji Junliang, Jiang Shangsong, Zhang Kexin, Chen Fenning, Wang Guocan, Yang Yongfeng, Luo Mansheng. 2013&. Pliocene tectonics and lithofacies paleogeography of the Tibetan Plateau. Geological Bulletin of China, 32(1):19~30.

Kapp P, Pelletier J D, Rohrmann A, Heermance R, Russell J, Ding L. 2011. Wind erosion in the Qaidam Basin, central Asia: Implications for tectonics, paleoclimate, and the source of the Loess Plateau. GSA Today, 21 (4):4~10.

Li Jiyan, Dong Zhibao. 2011&. Morphological parameters of Yardangs in southeastern Qaidam Basin. Bulletin of Soil and Water Conservation, 31(4):122~125.

Li Jiyan, Dong Zhibao, Li Enju, Yang Ningning. 2013&. Wind regime of Yardang lanform regions in the Qarhan salt lake. Journal of Desert Research, 33(5):1293~1298.

LiJiyan, Dong Zhibao, Qian Guangqiang, Zhang Zhengcai, Luo Wanyin, Lu Junfeng, Wang Meng. 2016. Yardangs in the Qaidam Basin, northwestern China: Distribution and morphology. Aeolian Research, 20: 89~99,

Li Lin, Shen Hongyan, Li Hongmei, Xiao Jianshe. 2015&. Regional differences of climate change in Qaidam Basin and its contributing factors. Journal of Natural Resources, 30(4):641~650.

Li Shuang. 2011&. Holocene climate and environmental changes documented by sediments from Lake Gahai in Qaidam Basin. Instructors: Zhang Jiawu. Lanzhou University Master Thesis: 1~55.

Lin Hong. 2014&. Provenance analysis and sedimentary facies of Paleogene and Neogene in the Eboliang area of the northern Qaidam Basin. Instructors: Li Fengjie. Chengdu University of Technology Master Thesis: 1~63.

Ma Yuzhen, Liu Kam-biu, Feng Zhaodong, Sang Yanli, Wang Wei, Sun Aizhi. 2008. A survey of modern pollen and vegetation along a south—north transect in Mongolia. Journal of Biogeography, 35(8): 1512~1532.

McCauley J F, Grolier M J, Breed C S. 1977. Yardangs of Peru and other Desert Regions: USGS interagency report. Astrogeology.

Mustafa Halimov, Fritz Fezer. 1990&. Eight yarding types in Central Asia. Journal of Desert Research, 10(1):1~12.

Nickling W, Ecclestone M. 1981. The effects of soluble salts on the threshold shear velocity of fine sand. Sedimentology, 28(4):505~510.

Niu Qinghe, Qu Jianjun, Li Xiaoze, Dong Guangrong, Zhang Kecun, Han Qingjie. 2011&. Review and prospect of Yardang landforms Research. Advances in Earth Science, 26(5):516~527.

Panah S K A, Komaki B, Goorabi A, Matinfar H R. 2007. Characterizing land cover types and surface condition of Yardang Region in Lut Desert (Iran) based upon Landsat satellite images. World Applied Sciences Journal, 2(3):212~228.

Qinghai Petroleum Administration Institute of Exploration and Development. 1988&. The Tertiary Ostracoda Group in Qaidam Basin. Nanjing University Press.

Ritley K. 2004. Yardangs and dome dunes northeast of Tavan Har, Gobi, Mongolia. Geological Society of America Bulletin, 36(4):33~36.

Staplin F L.1963. Pleistocene Ostracoda of Illinois: Part II. Subfamilies Cyclocyprinae, Cypridopinae, Ilyocyprinae; Families Darwinulidae and Cytheridae. Stratigraphic Ranges and Assemblage Patterns. Journal of Paleontology, 37(6):1164~1203.

Sun Xiangjun, Du Naiqiu, Weng Chengyu, Lin Ruifen, Wei Keqin. 1994&. Paleovegetation and paleoenvironment of Manasi Lake, Xinjiang, N. W. China during the last 14000 years. Quaternary Sciences, 14(3):239~248.

Wang Erchie, XuFengyin, Zhou Jianxun, Wan Jinglin, B. Clark Burchfie. 2006. Eastward migration of the Qaidam basin and its implications for Cenozoic evolution of the Altyn Tagh fault and associated river systems. GSA Bulletin, 118 (3~4): 349 - 365.

Wang Guocan, Zhang Kexin, Xiang Shuyuan, Wang An, Cao Kai, et al. 2014&. The Cenozoic Geological Map and Prospectus on the Tibetan Plateau and Its Neighborhoods (1: 1500000). Wuhan: China University of Geosciences Press: 1~166.

Wang Shuai, Ha Si. 2009&. Advances in the study of geomorphology and process of wind erosion landforms. Journal of Earth Sciences and Environment, 31(1): 100~105.

Ward A W, Greeley R. 1984. Evolution of the yardangs at Rogers Lake, California. Geological Society of America Bulletin, 95(7):829~837.

Wei Kaihong. 2013&. Study on open Terme Rick Mine landform evolution model and morphological differences. Science Technology and Engineering, 13(33):9908~9912.

Yin An, Dang Yuqi, Wang Licun, Jiang Wuming, Zhou Suping, Chen Xuanhua, Gehrels G E, McRivette M W. 2008. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (part 1): the southern Qilian Shan—Nan Shan thrust belt and northern Qaidam basin. Geological Society of America Bulletin, 120(7), 813~846.

Zhang Hucai, Wang Qiang, Peng Jinlan, Chen Guangjie. 2008&. Ostracod assemblages and their paleoenvironmental significance from shell bar section of paleolake Qarhan, Qaidam Basin. Quaternary Sciences, 28(1):103~111.

Zhang Kexin, Wang Guocan, Luo Mansheng, Ji Junliang, Xu Yadong, Song Bowen, et al. 2013&. Cenozoic Tectonic—facies Palaeogeography of the Qinghai—Tibet Plateau and Its Adjacent Areas and Its Specification (1: 3000000). Beijing: Geological Publishing House.

Zhang Kexin, Wang Guocan, Xu Yadong, Luo Mansheng, Ji Junliang, Xiao Guoqiao, Wang An, Song Bowen, Liang Yinpin, Jiang Shangsong, Cao Kai, Chen Ruiming, Yang Yongfeng. 2013. Sedimentary evolution of the Qinghai - Tibet Plateau in Cenozoic and its response to the uplift of the Plateau. Acta Geologica Sinica (English edition), 87(2):555~575.

Zhang Weilin, Fang Xiaomin, Song Chunhui, Erwin Appel, Yan Maodu, Wang Yadong. 2013. Late Neogene magnetostratigraphy in the western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) and its constraints on active tectonic uplift and progressive evolution of growth strata. Tectonophysics 599 (4), 107 - 116.

Zhou Jianxun, Xu Fengyin, Wang Tiecheng, Cao Aifeng, Yin Chengming. 2006. Cenozoic deformation history of the Qaidam basin, NW china: Results from cross-section restoration and implications for Qinghai—Tibet Plateau tectonics. Earth and Planetary Science Letters, 243(1~2):195~210.

Zhu Yunzhu, Li Wensheng, Wu Bihao, Liu Chenglin. 1989&. New recognition on the geology of the Yiliping Lake and the east and west Taijnar Lakes in the Qaidan Basin, Qinghai Province. Geological Review, 35(6):558~565.

Research on the Genesis of Semi-submerged Yardang Landform in the Duck Lake Area of Qaidam Basin

MAO Xiaochang[1)], LIU Xiang[2)], DONG Ying[3)], BAI Yongshan[4)], XU Yadong[2)], SONG Bowen[5)]

1) *China Geological Survey*, *Beijing*, 100037;

2) *School of Earth Sciences*, *China University of Geosciences*, *Wuhan*, 430074;

3) *China Institute of Geological Environment Monitoring*, *Beijing*, 100081;

4) *Qinghai Geological Survey Institute*, *Xining*, 810012;

5) *Institute of Geological Survey*, *China University of Geosciences*, *Wuhan*, 430074

Abstract: Through the study of the stratigraphic sequence, sedimentary facies, formation age of the strata that make up Semi-submerged Yardang landform and the tectonic conditions, climate and human factors of the evolution of Yardang landform after the formation of stratigraphic in the Duck Lake area of Qaidam Basin in Qinghai Province, the formation of Semi-submerged Yardang landform in the study area is the Miocene Upper Youshashan Formation, and the ostracod assemblages indicate that the formation age is late Miocene. The analysis of sedimentary facies and sporo-pollen assemblages reveal that this area was warm and arid climate in late Miocene and it was covered by the ancient lake and accepted lacustrine facies and lacustrine delta front facies sedimentary. In the Pliocene, the ancient lake shrank and disappeared under the dual role of regional tectonic uplift and arid climate. Pleistocene in extreme drought and strong monsoon environments, the upper strata of the Upper Youshashan Formation was lifted up to the surface, formed Yardang landform under the action of wind erosion-dominated external forces. From late Pleistocene to early Holocene due to the arrival of the last interglacial, the climate turned warm and moist, and the lake invaded to form three lakes. In recent years, the distribution pattern of lakes has been changed under the action of human activities, which presents the landscape of today's Duck Lake. Today, the lake area of Duck Lake drowns some Yardang and becomes a peculiar Semi-submerged Yardang landform landscape.

Keywords: semi-submerged Yardang; genesis; geomorphic evolution; Upper Youshashan Formation; Qaidam Basin

Acknowledgements: This study was financially supported by China Geological Survey (No. 121201004000150013, No. DD20160345, No. 121201014000150018)

First author: MAO Xiaochang, male, born in 1979, Ph. D. in tectonic geology and Senior Engineer. Work in China Geological Survey and mainly engaged in fundamental geological research and national geological mapping technology management. Address: No.45 Fuwai Street, Xicheng District, Beijing, 100037. Email: xmaoteng@163.com

Manuscript received on: 2018-04-21; Accepted on: 2018-09-30; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.06.014