

文章编号:1001-8166(2011)05-0516-12

雅丹地貌研究评述与展望^{*}

牛清河, 屈建军, 李孝泽, 董光荣, 张克存, 韩庆杰

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室敦煌戈壁荒漠研究站

甘肃省风沙灾害防治工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:雅丹地貌是风蚀地貌研究的重要对象, 目前研究较为薄弱。雅丹地貌自瑞典探险家斯文赫定命名并开始研究以来, 已有百余年的历史。随着科学技术的不断进步和研究方法的更新, 已取得了重要进展, 但仍存在许多问题。首先对雅丹地貌的科学定义、空间分布、形态特征、形成发育条件、形成发育过程、形成年代、与环境的关系和分类等8方面的进展和问题进行综合评述。在此基础上, 对未来的研究前景进行了展望, 并提出明确科学定义; 加强野外监测和室内定量研究; 突破雅丹形成年代研究瓶颈, 深化雅丹与环境关系研究; 加大研究资助力度等4点建议。

关 键 词:雅丹地貌; 定量研究; 风蚀

中图分类号:P931

文献标志码:A

雅丹地貌, 连片成群分布, 气势恢宏, 千姿百态, 受到旅游管理部门的关注和旅游探险者的广泛青睐, 成为干旱区旅游的新热点^[1~8]。同时, 其独特的形态与神秘的成因, 早在19世纪晚期就受到探险家和地质地理学者的重视^[9, 10]。

“雅丹”这一专业名词自斯文赫定(Sven Hedin)自20世纪初正式提出^[11], 并为地学工作者逐渐接受, 进行研究以来, 迄今已有百余年的历史。在此期间, 国内外地质地貌学家对雅丹地貌的定义、形成年代、发育过程等方面进行了大量研究。在国外, 科学技术, 特别是遥感技术的进步不断推动雅丹地貌的研究, 20世纪60年代末至90年代初, 随着航空航天影像的广泛应用, 在地球和其他类地行星上不断发现更多类似地貌形态, 国际地貌学家纷纷开展雅丹地貌研究^[12~22]; 20世纪90年代末至今, 随着高分辨率成像技术(HiRISE)的发展和人类对外太空的探索, 激发了人类对地外行星雅丹地貌研究的更大兴趣, 也带动了地球上雅丹地貌的研究^[23~45]。国内对雅丹地貌的研究主要经历了以下3个阶段: 20世纪30年代初, 中国西北科学考察团对罗布泊等地

进行考察时, 对雅丹地貌的形态特征进行描述和分类, 并对古人将雅丹命名为龙城、白龙堆做出了科学形象的解释^[46, 47]; 20世纪80年代, 中国科学院新疆分院罗布泊综合考察队, 对罗布泊地区的雅丹分布状况、形成机理与过程等进行了研究^[48, 49]; 21世纪以来, 随着国内干旱区旅游资源的开发及库姆塔格沙漠考察研究的深入, 促发中国学者对雅丹地貌分布、形成发育过程及其旅游资源开发研究的热潮^[4~8, 50~54]。

目前, 雅丹地貌已成为风蚀地貌的重要研究内容, 取得了长足的进步, 但仍有许多问题亟待深入探讨。为进一步推进雅丹地貌的研究, 本文从雅丹地貌的定义等8个方面, 对前人的研究进展和问题进行评述, 并提出展望和建议。

1 研究进展和问题

1.1 雅丹定义的发展

在“雅丹”一词未被地学界广泛使用前, 有诸多称谓。在东汉史学家班固所著的《汉书·地理志》卷二八下中被称为龙城、白龙堆和龙堆^[55], Stapff^[9]

^{*} 收稿日期: 2010-10-27; 修回日期: 2011-02-13.

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目“罗布泊地区雅丹地貌形成发育过程研究”(编号: 40671021)资助。

作者简介: 牛清河(1984-), 男, 甘肃会宁人, 博士研究生, 主要从事风沙地貌与风沙工程研究. E-mail: niuqh@lzb.ac.cn

称其为“空气动力学地形(aerodynamic landforms)”,此外还有“狮身人面像(sphinx hills)”^[10]、“剥蚀丘(bugra vyduvaniye; deflation hill)”^[56]、“沙漠城(shahr lut; desert cities)”^[57]、“泥狮(mud lions)”^[58]、“土阜”^[47]等不同命名。这些名称虽然形象,但其科学内涵和流传欠缺,并未受到国内外学者的认可。1899—1903年,瑞典探险家斯文赫定在中国新疆罗布泊考察时,将古湖周围成群分布,长数百米,高2~3 m以上,走向东北—西南,先水蚀后风蚀而形成的形态各异的地貌,按当地维吾尔语称其为Yardang^[11](原意是“具有陡壁的小丘”)。之后,随着他的著作《中亚和西藏》(Central Asia and Tibet)在国内外学界的广泛传播,在中国被音译为“雅丹”。从此,“Yardang(雅丹)”一词便正式登上科学殿堂,成为地质地理学者追寻、探索的重要对象。根据斯文赫定的描述和研究,“雅丹”概念具有以下限定:①形成于极端干旱区;②物质组成以第四纪河湖相沉积物为主,岩性松软—中等固结;③外营力以水蚀和风蚀为主;④分布范围较大,相对集中,且排列整齐;⑤高度和长度达到一定规模;⑥形态千姿百态。

随着研究范围的扩大,许多学者所定义的雅丹内涵与原创者并不完全一致。在国际上,大致有以下4种观点:一是Blackwelder^[59]认为雅丹是具有陡壁的垄岗与垄间槽地的组合,高数英寸(约几厘米)到25英尺(约7.6 m)以上,不仅在松软物质上,而且在第三纪湖相沉积和更新世沙丘等胶结沉积物上都有发育,强调了雅丹是垄岗和槽地组合形态,以及其组成物质的多样性;二是Cooke等^[60],McCauley等^[17]和Mainguet^[16]认为雅丹是发育在包括固结中等的第四纪湖相粉砂和粘土沉积物、硅藻土、白垩土和坚硬的砂岩、花岗岩及其他坚硬的岩石上的风蚀垄,其典型形态长宽比为4:1,有些大雅丹的长宽比率达10:1,使雅丹发育的物质组成进一步扩展,同时强调了形态为长垄状;三是Halimov等^[22],Goudie等^[23,61],Brookes^[24]和Laity^[25,62]泛指分布于世界绝大多数沙漠中,发育在软硬形成时代不同的岩性地层上的流线型丘陵,雅丹发育的物质基础不再受岩性限制,并强调了形态上的流线型;四是Ward等^[12]、Breed等^[63]强调仅指发育在第四纪松软沉积物上的小型风蚀地貌形态。在国内也存在3种观点:夏训诚^[64]在研究罗布泊地区雅丹时,认为其发育在河湖相泥岩、粉砂岩和砂岩互层上,在有风力作用参与的同时,特别强调了流水在雅丹形成发育过程中的作用。吴正^[65]则强调雅丹发育在包括河湖

相沉积物等未固结的土状堆积物上,除主要分布于极端干旱区外,在湿润的近海岸地区也有分布^[65,70]。杨更^[54]则认为,雅丹经长期风力侵蚀,由一系列平行的垄脊和沟槽构成的景观,地层产状近水平,多为湖积相,但对地层软硬程度和年代未作限制。

雅丹定义的不统一,主要是对雅丹定义域过大造成的。一方面说明雅丹研究在扩展和深入,另一方面也说明对雅丹的定义出现了分歧,使各个学者所指的雅丹地貌存在很大的不同。而这对雅丹地貌研究的传播、交流及其成果推广应用造成严重影响。

1.2 雅丹空间分布

各学者的概念不同,加之技术手段的不断更新和研究的深入,雅丹地貌在各地陆续得到发现,分布地点也在不断增多。目前,除大洋洲和南极洲外,其他各大洲均有发现。主要分布于降雨稀少、植被稀疏、风蚀作用强烈的干旱区和极端干旱区的沙漠边缘,如西亚(特别是阿拉伯半岛)和中亚,非洲撒哈拉沙漠和纳米布沙漠,北美西部荒漠地区、南美洲西部海岸荒漠区,欧洲西班牙的埃布罗低地。中国主要分布在新疆罗布泊、哈密、疏勒河中下游地区、柴达木盆地和内蒙古乌蒙等地。雅丹地貌发育的物质基础广泛,有河湖相沉积物,也有火成岩、变质岩等;组成物质地质年代跨度大,从全新世到元古代均有报道。据一些研究报道,在地外行星上也分布有类雅丹地貌,如在火星赤道附近Amazonis Planitia地区的梅杜莎槽沟层(Medusae Fossae Formation)上也有大面积的分布(表1)。

随着科学技术的进步和人类活动范围的扩大,在地球和其他星球上还会有更多的雅丹地貌被发现。但由于定义不统一,各学者所说的雅丹地貌在形态、规模、形成条件、动力、年代和环境等方面存在明显的差异,使进一步全面对比研究面临很大困难。

1.3 雅丹形态特征研究

雅丹地貌形态特征主要采用定性和定量描述2种方法研究。在雅丹研究史上,定性描述始终占有重要地位。斯文赫定在描述罗布泊地区雅丹时,曾形象地描述为桌状、飞檐、雕塑、塔形、城墙状、古屋、壁垒、卧狮、伏龙、狮身人面像和睡犬等^[11]。此后在其他各地的研究中,有学者也描述了长垄状^[16,17,60]、覆舟状^[25,85]和流线型^[25,62,63]等。在敦煌雅丹国家地质公园内,还有舰队出海、孔雀台、天生桥、凯旋门、比萨斜塔、蒙古包等各种形象,可谓“千姿百态”。此类定性描述既是雅丹地貌引人入

表 1 文献报道的雅丹地貌发现地点

Table 1 Summary of yardang landforms location in literates

分布区	岩性	文献
亚洲		
中国新疆罗布泊孔雀河下游龙城雅丹地貌	中晚更新世河湖相泥岩、砂质泥岩、砂岩	[64],[54]
中国新疆罗布泊孔雀河下游楼兰古城雅丹地貌	中晚更新世湖相富含石膏层的浅棕色泥岩	[64],[54]
中国新疆罗布泊白龙堆雅丹地貌	中晚更新世湖相灰白色砂泥岩夹石膏层	[64],[54]
中国敦煌雅丹国家地质公园(三垄沙雅丹地貌)	中晚更新世河湖相浅棕色泥岩和砂岩互层	[64],[8],[54]
中国新疆阿奇克谷地雅丹	中晚更新世河湖相灰白色泥岩和砂岩互层	[64],[52],[54]
中国新疆乌尔禾魔鬼城	中生界白垩系吐谷鲁群的灰绿色、棕红色泥岩、砂质泥岩、砂岩、砾岩	[54]
中国新疆奇台魔鬼城	侏罗纪、白垩纪的陆相地层	[54]
中国新疆五彩湾雅丹地貌	中—上侏罗统石树沟群泥岩夹砂岩、含砾砂岩	[54]
中国新疆哈密五堡魔鬼城	古近系—新近系粉红色、灰白色砂岩、泥岩和砂砾岩水平地层	[54]
中国新疆哈密十三间房	白垩系、侏罗系和古近系—新近系白色、红色砂岩、泥岩和砂砾岩层	[54]
中国甘肃瓜州布隆吉雅丹	晚更新世粘土和亚粘土组成的河流淤积层	[66]
中国甘肃瓜州桥湾古城雅丹	晚更新世粘土和亚粘土组成的河流淤积层	[66]
中国甘肃瓜州双塔水库西	晚更新世粘土和亚粘土组成的河流淤积层	[66]
中国甘肃瓜州锁阳城南	晚更新世洪积层	[66]
中国甘肃瓜州百齐堡	全新世冲积层	[66]
中国柴达木盆地西北	第三纪泥岩、粉砂岩和砂岩	[67],[22]
中国内蒙古乌盟后山地区	第四纪冲积物和风积物	[68],[69]
中国广东惠来靖海资深园	晚更新世中晚期的风沙沉积物(老红砂)	[65],[70]
蒙古东戈壁省 Tavan Har	上白垩纪砂岩和泥岩	[29]
塔吉克斯坦喀拉—布拉	第四纪冲积物	[27]
印度杰伊瑟尔梅尔	始新世石灰岩	[71]
阿富汗哈姆恩	第四纪沉积物与湖相沉积物	[27]
伊朗卢特沙漠	更新世泥质粉砂岩和含石膏的砂岩	[57]
叙利亚	固结沙丘	[72]
巴林	风成沉积岩与始新世石灰岩	[73]
阿曼沃希拜沙漠	风成沉积岩	[74]
沙特阿拉伯北部	寒武纪—奥陶纪砂岩和其他基岩	[43],[27]
科威特北部 Um Al-Rimam 低地	中新世中期砂岩,渐新世—中新世晚期钙质岩和第四纪沉积物	[26]
非洲		
马里	全新世湖相沉积物	[75]
埃及哈里杰	全新世湖泊与沼泽相沉积物	[61]
埃及费拉菲拉	干湖盆沉积物;全新世湖相沉积物	[76],[77]
埃及达赫莱地区	早第三纪石灰岩	[24]
埃及西部沙漠	硅化石灰石,湖相沉积岩和白垩石灰岩;结晶石灰岩、砂岩、页岩和花岗岩	[78],[27],[15]
埃及西奈半岛	努比亚组砂岩	[74]

续表

分布区	岩性	文献
纳米比亚南部	火山侵入岩、片岩、流纹岩、砂岩和白云岩等; 古老的复杂结晶变质岩	[79],[80],[27]
纳米比亚北部库内纳尔格	元古代 Swakop 组火成岩和变质岩(片岩、大理岩、千枚岩等)	[27]
乍得博尔库	古生代和下中生代砂岩	[81],[78]
美国罗格湖	中等固结的更新世近岸和湖岸线沉积物(砾、砂、粉砂和粘土沉积物)	[12]
美国南达科他州	页岩	[82]
美国加利福尼亚州莫哈维	全新世干湖盆沙丘沉积	[59],[83]
美国科罗拉多高原	纳瓦霍组砂岩和中生代泥岩和粉砂岩	[74]
南美洲		
秘鲁北部塔拉拉	上始新世—古新世页岩和砂岩	[18]
秘鲁中部帕拉卡斯—伊卡谷地	第三纪页岩、粉砂岩和砂岩	[18]
秘鲁皮斯科	海相沉积物	[84]
阿根廷门多萨 Payun Matru 火山区	火山凝灰岩和火山熔岩	[40]
智利、玻利维亚和阿根廷的安第斯山中段	不同硬度的火山凝灰岩	[74],[30],[34]
欧洲		
西班牙埃布罗低地	中新世石灰岩和石膏,未固结的湖相沉积物	[28]
地外行星		
火星 Amazonis Planitia 地区	梅杜莎槽沟层	[20],[42]

注:此表除引用文献[74]、文献[27]和文献[42]等的统计外,又添加了部分报道

胜之处,也是容易造成对雅丹形态认识挂一漏万的原因。

为了克服定性描述的缺点,陆续有一些学者进行了定量描述研究。这里首先遇到的问题是如何从无数雅丹地貌形态中挑选出能反映雅丹地貌本质属性的基本形态。在这方面存在2种意见:有学者认为是垄状,如 McCauley 等^[17]认为是发育在粘结物质上的风蚀垄状地貌,也有学者认为是流线型,如 Brookes^[86]认为雅丹仅包括线性风蚀地貌中的流线型地貌。定量描述主要表现在对雅丹地貌的平均坡度及形态特征参数(如长、宽、高和体积等)比率的研究。McCauley 等^[17]和 Gutiérrez-Elorza 等^[28]通过实地测量和地形图测算得出,秘鲁中部海岸荒漠区和西班牙埃布罗低地雅丹的迎风端平均坡度为30°,背风端平均坡度为6°。Cooke 等^[60]和 Manguet^[16,81]对乍得博尔库、伊朗卢特沙漠和非洲撒哈拉地区雅丹的观测得出长宽比为10∶1;Halimov 等^[22]发现长宽高的比率为10∶2∶1;Goudie 等^[61]在埃及的研究得出的体积、长、宽和高的比率为18.7∶9.9∶2.7∶1;而 Ward 等^[12]通过风洞实验模拟研究得出理想的雅丹地貌长宽比为4∶1。从这些数值来看,各人都不相同。如果长宽比1∶1和4∶1,认为是方形和流

线型,那么10∶1、10∶2和10∶3可能更接近垄状。

为了对雅丹的理想长宽比率给出合理解释,Fox 等^[87]和 Hagedorn^[88]利用流体力学和空气动力学的方法和理论做了计算,发现较长的雅丹体为强烈的表面摩擦力所为,而宽大雅丹体则为强烈的挤压阻力所为,当这一形态的比率为0.27(接近于4∶1)时十分适应风力,气流流动阻力很小,无法分离出背风坡的尾流(图1)。这时的雅丹形态表现为典型的流线型。看来流线型雅丹应是风力作用对长垄状雅丹进一步加工而形成的。

雅丹形态研究中的主要问题是对雅丹地貌的基本形态究竟是长垄状还是流线型认识不一。实际上这2种形态同一地点也同时存在,由于雅丹发育时间和组成物质等不同,还有更多形态如方形、柱状的存在,不能只强调2种基本形态。应该指出,定量研究雅丹形态特征是非常必要的,但由于雅丹形态变化多端,只有定量研究是无法全面表达雅丹的具体形态的,因此在雅丹研究中定性和定量研究,两者不可偏废其一。

1.4 雅丹形成发育条件研究

1.4.1 岩性条件

岩性条件是雅丹形成发育的基础。由前述可

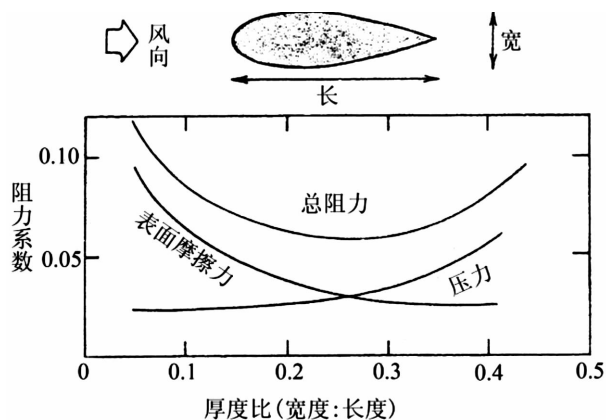


图 1 雅丹形态的阻力系数—厚度函数^[87]

Fig. 1 Coefficient of drag on yardangs form as a function of the thickness^[87]

见,因对雅丹的定义不一致,雅丹形成发育可以在不同硬度和不同时代的岩石上。也有学者认为除硬度外,岩性中还应考虑其结构,并做了研究。如 Goudie^[27]认为形成雅丹的岩体岩性相对一致,构造简单,但有便于下切的节理发育。夏训诚^[64]认为具有泥岩和砂岩互层的河湖相沉积物,泥岩层内发育有便于侵蚀的水平与垂直节理。

1.4.2 环境条件

目前发现的绝大多数雅丹分布在极端干旱区,年降水量小于 50 mm,植被稀少的平原地区,风蚀作用强烈;或较为湿润的洼地,盐类风化作用、地下水作用强烈的地区^[27]。很多学者根据地质历史时期气候变化研究,推断高大的雅丹是在更新世冰期干冷多风的气候环境下形成的^[89~91],或更早的干旱气候环境下形成的^[13, 27, 60]。

1.4.3 动力条件

动力条件是雅丹地貌形成的关键因素,现在主要集中于外营力条件的研究,包括风力和水力等方面。雅丹分布于极端干旱区,风力作用是其主要外动力。大多数学者认为单一风向的强风是雅丹形成的主要外营力^[17, 28, 80, 92],也有学者研究认为部分雅丹的形成是由 2 组风向相反的风况所致^[29, 63]。对风蚀的 2 种作用方式——吹蚀和磨蚀的作用机理,不同的学者也有不同的认识。El-Baz 等^[13]认为吹蚀作用在不同岩性的雅丹上作用大不相同,在坚硬的岩石雅丹上,吹蚀作用不明显;McCauley 等^[17]认为松软岩体上平滑且具有流线型外形的雅丹是吹蚀作用的结果。Hobbs^[92]、Hagedorn^[88]和 Grolier 等^[15]认为磨蚀作用主要表现在雅丹整体形态与坡脚岩体

颜色变化上,迎风端及两侧下部的抛光面和风蚀槽是由磨蚀作用形成的,并导致迎风端和两侧槽地的下切;但 Whitney^[93]认为风力磨蚀太强则会导致风蚀槽的破坏,二次流形成的漩涡和携带的粉细沙等悬浮物质作用于岩体而形成风蚀槽,并将这种二次流命名为界面流(interfacial flow),认为是它携带微小颗粒磨蚀整个雅丹体。对风的吹蚀和磨蚀这 2 种作用方式的相对重要性,亦有不同观点。对于美国加州的罗格湖区雅丹,McCauley 等^[17]认为是吹蚀作用形成了平滑的流线型垄岗,而磨蚀作用则导致迎风端及两侧的下切,使雅丹间槽地变低;Ward 等^[12]则认为磨蚀在槽地和垄岗的初期形成阶段起到了很重要的作用,此后吹蚀作用不断加强,并与磨蚀作用一起形成“风动力形态”(即流线型);而 Blackwelder^[59]认为罗格湖区低矮的圆形雅丹是其两侧与顶部随气流跃移的沙粒磨蚀而形成的。

洪水作用也是重要的外营力。但对于洪水对雅丹的作用机理,也存在不同的看法:大部分学者认为,在雅丹形成初期,风沿着洪水形成的冲沟吹蚀,使冲沟不断加宽加深^[11, 12, 25, 59, 63, 64]。也有学者认为,在雅丹形成之后,洪水还会再次侵蚀雅丹间槽地,并在雅丹坡面上发育密集的切沟^[12, 50]。同时,也有学者提出洪水在雅丹形成过程中存在正反两种作用,认为强烈的洪水作用会起到破坏雅丹的作用^[17, 27]。

除上述定向动力条件外,部分雅丹形成过程中,还存在其他非定向营力,如风化作用、重力坍塌、盐类风化和龟裂等^[25, 27]。

各营力在雅丹形成发育过程中各阶段的相对作用亦不同。Goudie^[27]认为磨蚀作用在雅丹地貌形成初期及对相对高度较低的雅丹作用强烈;吹蚀对岩性较软的沉积地层作用明显;流水侵蚀切割作用,特别是山区暴雨洪水作用在雅丹形成初期起到很重要的作用,为风的作用提供通道;而盐类风化和干湿变化为风力搬运提供了大量的碎屑物质。在雅丹形成后,重力坍塌也逐渐成为重要的外营力因素。

在雅丹地貌形成发育条件研究中,首先,定量研究十分薄弱。目前仅有 Ward 等^[12]对吹蚀作用进行了风洞模拟实验,而定量研究各条件,尤其是动力条件对雅丹形成发育过程的影响对理解雅丹发育模式至关重要。其次是缺乏长期监测。目前还没有报道在雅丹分布区建立长期的观测场,对雅丹形成发育过程及其环境要素进行观测。再次,对雅丹形成发育的内营力作用重视不够。雅丹发育的内营力主要

有构造抬升、沉降、褶皱、断层和节理等,这些内营力因素对雅丹形成发育的地质基础和对雅丹形成发育过程起到控制作用。如构造下沉,则导致地下水位升高,进而使雅丹底部遭受地下水浸泡,降低粘结系数,最终导致重力坍塌,快速走向衰亡;若构造抬升过高,则使雅丹发育的地层离地下水位太深,风化作用和风蚀作用则会更强,也会导致雅丹地貌衰亡。

1.5 雅丹形成发育过程研究

雅丹的形成发育过程研究,主要采用以下2种方法,一种是野外考察基础上的理论推断分析,一种是实验模拟。

许多学者利用第一种方法对雅丹地貌的发育过程做出了推断^[11, 12, 22, 25~28, 59, 62~64, 88],所得出的结论都是大同小异,比较有代表性的模式有以下2种:一是夏训诚^[64]通过对中国罗布泊地区雅丹地貌野外考察和理论推断,认为其发育过程分为4个阶段。第一阶段为表面风化破坏阶段,主要作用是风化作用,产生许多水平和垂直节理,使下伏的疏松沙层逐渐暴露地表,为外营力侵蚀创造有利条件;第二阶段为锥形雅丹地貌形成阶段,经风化作用形成的碎屑物质在风力或流水作用下被搬运,使地表起伏不平,但相对高差不到1 m;第三阶段是雅丹形成阶段,因地表起伏和节理扩大,更有利于风化剥蚀作用,使表层泥岩逐渐消失,沙层直接暴露在地表,侵蚀速度加快,低洼处不断加深和扩大,而凸起的部分因受泥岩保护而侵蚀相对微弱,形成相对高差数米到数十米的土丘与沟谷相间的地貌组合;第四阶段是雅丹地貌消失阶段,不断的外力作用使凸起部分的面积不断缩小,低洼面积不断扩大,形成孤立的小丘,其下部的沙层因风蚀等被掏空,进而发生块体运动,面积逐渐减小,高度也不断下降,最后消失。二是 Halimov 等^[22]通过对柴达木盆地雅丹地貌的研究,认为在发育的各阶段具有代表性的地貌形态,并且存在逻辑循环。他们认为扇缘或古湖床平原面受构造隆升后,在外营力作用下形成方山状雅丹,再逐渐演化为长垄状、平顶塔状和金字塔状,平顶塔状最后也演变为金字塔状,在此过程中,雅丹地貌是逐渐增高的。而古湖床平原面受盐构造褶皱影响,在外营力作用下形成犬牙状,并进一步发展为锥状,此过程中雅丹也是增高的。另外,扇缘或古湖床平原面在外营力作用下,形成逐渐增高的拱背状雅丹,此后高度降低,形成鲸背状雅丹,而长垄状雅丹和鲸背状雅丹进一步降低,形成低矮流线鲸背状,最后全部消失,形成新平原(图2)。但 Gutiérrez-Elorza 等^[28]强调在该循

环中应考虑构造因素,其将破坏这种循环过程。

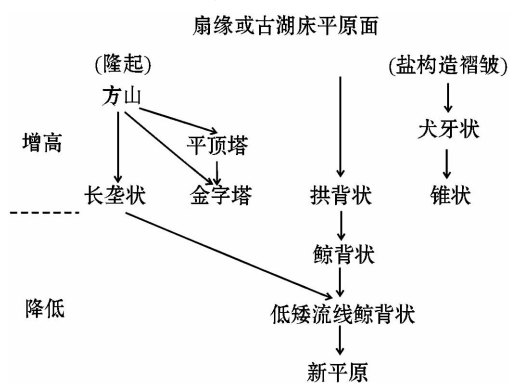


图2 雅丹地貌循环示意图^[22]

Fig. 2 Cyclic sketch map of yardang landforms evolution^[22]

实验模拟的发育模式主要是通过风洞实验得出的。Ward 等^[12]将中细粒石英砂、玉米粉以及咖啡渣按1:1:1的比例混合并制作成雅丹模型,进行风洞模拟实验。通过对不同形状模型的风洞模拟实验,得出了风蚀部位的先后次序依次是迎风侧棱角部位、迎风坡面、背风侧棱角及模型两侧、背风坡面。各种形状的模型,最后稳定形态的长宽比为4:1,风蚀的速率也逐渐降低。同时认为迎风端主要发生磨蚀作用,而中部和背风端主要发生吹蚀及回流和涡旋作用。

虽然诸多学者对雅丹形成发育模式进行了研究,但大多数只是在野外调查基础上的理论推断,对磨蚀、洪水和坍塌等在模式中的作用缺乏定量研究,对这些营力条件相互叠加后在形成发育过程中的作用研究少之又少。此外在模式中对内营力作用考虑较少。

1.6 雅丹形成年代研究

对雅丹形成年代研究的方法主要有4种:

(1) 实地调查和观测现代风蚀速率来间接推算其形成年代。如夏训诚^[64]根据罗布泊楼兰古城的建筑物遗址风蚀调查结果,认为该区的风蚀速率为0.24~0.47 cm/a,那里的雅丹是近千年的风蚀产物;西班牙埃布罗低地雅丹区域倾倒的石膏废弃物上形成的雅丹,Gutiérrez-Elorza 等^[28]认为其形成不到100 a。

(2) 获取雅丹地貌顶部的地层年代推算雅丹地貌的形成年代。如 Clarke 等^[83]用红外释光法对美国莫哈维荒漠1 m高的小型雅丹进行测年,得出其形成时间不到250 a。

(3) 对雅丹地区内存在的文物测年来推断雅丹形成年代。Bohlin^[94]和 Hoerner^[95]分别对罗布泊和

敦煌附近细沙中的陶器进行定年,认为那里的中型雅丹在 1.5~2.0 ka BP 开始形成。

(4) 通过分析雅丹周边沙漠的形成年代,洞穴堆积物等记录的区域地质历史时期气候变化和前人的气候变化研究成果,间接推断雅丹形成年代,这也是学者们应用比较多的方法之一。如 El-Baz 等^[13]根据区域地质历史时期的气候变化,认为埃及西部荒漠大型雅丹的风蚀历史可上溯到中新世晚期或上新世早期;Beadnell^[96]、Peel^[89]和 Hagedorn^[88]认为非洲撒哈拉中型雅丹是在新石器洪积期之后形成的;Haynes^[97]认为撒哈拉东部的雅丹地貌是在 4.5 ka BP 开始的极端干早期形成的;Washington 等^[98]认为乍得 Bodele 低地 4 m 高的雅丹可能形成 1.2~2.4 ka BP;Goudie^[99]通过对非洲纳米布沙漠形成年代来推测纳米比亚海岸的大型雅丹可能形成于数百万年前;Inbar 等^[40]认为阿根廷 Payun Matru 火山区玄武岩上的雅丹形成于干旱而多风的更新世晚期—全新世初期;Vincent 等^[43]根据洞穴堆积物记录的气候变化情况,推断沙特阿拉伯西北部寒武纪—奥陶纪砂岩的雅丹地貌在 400 ka BP 开始形成;郑本兴等^[8]通过分析周边区域地质历史演化与前人研究结果,认为敦煌雅丹地质公园的雅丹地貌是晚更新世中晚期开始切割的。

除上述方法的单独应用外,还有学者组合应用这些方法来推断雅丹的形成年代。如 Al-Dousari 等^[26]通过综合前人区域气候研究,结合实地观测风蚀速率,推算出科威特 Um Al-Rimam 低地雅丹的形成年代为 44~1 500 a BP。

雅丹地貌是侵蚀地貌,不同于堆积地貌,其形成年代不同于雅丹地层的年代,地层开始被切割的年代才是雅丹开始形成的年代。因此,雅丹形成年代的断定存在很大的难度,还没有直接的方法来测定其形成年代,这也是雅丹地貌研究的难点。目前只有通过一系列的间接方法来推测其形成的大致年代,但准确性欠佳。由于不同或同一区域的岩性、动力、气候和规模存在差异性,雅丹地貌的形成年代也是千差万别的。

1.7 雅丹与环境关系研究

雅丹与环境的关系研究主要包括雅丹地层的形成环境和雅丹地貌的形成发育环境。在前一方面,目前研究甚少;后一方面,已有一些研究成果积累,但仍停留于推测阶段。多数学者认为大型雅丹形成的主要时期为更新世干冷多风的冰期^[89~91],也有学者认为部分区域的雅丹形成于中新世和上新世干旱

期^[13, 27, 60],但还没有直接的证据。Brookes^[24, 86, 100]利用雅丹地貌的走向来反推埃及西部沙漠地区全新世的风况,并根据大小雅丹地貌之间的叠置关系等确定埃及利比亚沙漠地区自 2.4 Ma BP 以来的大陆尺度的干旱期中至少经历了 2 次风蚀循环过程,认为大雅丹之上的小雅丹是上一期侵蚀循环的遗迹。通过对雅丹风蚀速率的观测研究来反映沉积岩风蚀状况,前人已做了一些工作。如 Ward 等^[12]利用摄影测量的方法估算出美国莫哈维荒漠罗格湖滨雅丹迎风端的风蚀速率为 2 cm/a,而侧部为 0.5 cm/a;Goudie 等^[61]对埃及西南部雅丹地区的风蚀速率进行推算,得出其风蚀速率为 1.5 km/ka;Al-Dousari 等^[26]观测得出科威特 Um Al-Rimam 低地泥质雅丹迎风端最大风蚀速率为 1 cm/a,而侧部为 0.5 cm/a,平均风蚀速率为 0.4 cm/a;董治宝等^[69]通过调查内蒙古乌蒙后山地区雅丹地貌的形成年代和高度,计算了该区域的年风蚀厚度、风蚀量和风蚀模数。对雅丹与环境关系的研究,不仅可以揭示雅丹形成过程中相关地区的气候环境及其与雅丹和沙漠的关系,了解雅丹区土地风蚀现状,对防治土地沙漠化有重要意义,而且对第四纪以来连续堆积的河湖相的雅丹本体地层的环境研究,还有助于理解雅丹发育以前该区域地质历史时期的环境演化及其与雅丹和沙漠的生消联系,探寻雅丹和沙漠的生消规律变化。可惜这两方面的研究几乎还是个空白。

1.8 雅丹分类研究

雅丹分类的目的是将众多形态、规模、年代及发育阶段和成因不同的雅丹地貌分别归类并确定它们在雅丹地貌分类系统中的位置和联系。由于采用的分类原则不同,各种分类系统也有差异。从已有研究来看(表 2),国内有 3 种分类系统。其中陈宗器^[46]按大小与形成年代将雅丹按形态分为迈赛(mesas,平顶山)和雅丹(yardangs);夏训诚^[64]按成因把雅丹分为风蚀为主的雅丹、水蚀为主的雅丹和先水蚀后风蚀的雅丹三类;郑本兴^①按雅丹地层地球化学组成不同形成的颜色差异分为黄色雅丹、白色雅丹和黄色雅丹。国外有 2 种分类系统,除了Cooke 等^[60]按雅丹形态大小分为小、中、大三类雅丹外,需要重视的是 Halimov 等^[22]根据形态和发育阶段,定性和定量相结合的原则,对柴达木盆地雅丹地貌提出的分类系统(表 3),在当前雅丹地貌分类研究中值得借鉴。

① 郑本兴,屈建军. 走进雅丹——干旱地区的科学迷宫,2005.

表 2 雅丹地貌分类系统

Table 2 Summary of yardangs landform's classification system

学者	分类原则	类别
陈宗器	大小与形成年代	迈赛(Mesas) 和雅丹(Yardangs) *
夏训诚	成因	风蚀雅丹、水蚀雅丹、先水蚀后风蚀雅丹
Cooke 等	形态大小	小雅丹(micro-yardangs)、中雅丹(meso-yardangs) 和大雅丹(mega-yardangs) **
郑本兴等	地球化学性质	黄色雅丹、白色雅丹和红色雅丹***
Halimov 等	形态和发育阶段	详见表 3

注: * 迈赛高 10 ~ 30 m, 年代较古; 雅丹低于 1 m, 年代较新; ** 3 类雅丹地貌所对应的长度分别是 <10 m, 10 ~ 10³ m, >10³ m。其中中雅丹被认为是典型雅丹; *** 黄色雅丹以第四纪河湖相粉沙、粘土为主要组成物质; 白色雅丹以白色泥岩和石膏层为主要组成物质; 红色雅丹以含有大量赤铁矿的第三纪沉积物为主要组成物质

表 3 柴达木盆地雅丹地貌分类系统^[22]

Table 3 Classification of yardangs landform in Qaidam Basin^[22]

类型	结构倾斜/°	高度/m	宽度/m	长度/m	蚀沟宽度/m	发育阶段	地表特征
方山	0 ~ 10	10 ~ 15	100 ~ 2	1 000 ~ 2	变化不一	初期	蚀沟加深
犬牙状	15 ~ 45	3 ~ 10	5 ~ 10	30 ~ 10	—	早期	底部连接
锥状	45	20	30	30	2	迅速减少	孤立
金字塔状	平坦	4 ~ 15	6 ~ 15	30 ~ 10	10 ~ 50	迅速减少	陡壁
长垄状	—	>30	>50	100 ~ 5 000	200 ~ 350	—	—
拱背	—	10 ~ 30	15 ~ 6	100 ~ 35	—	—	—
鲸背状	—	3	6	15	100	—	—
低矮流线鲸背状	—	3 ~ 0.5	5 ~ 1	30 ~ 5	100 ~ 500	相对稳定	适应气流

2 展望和建议

尽管雅丹地貌研究在取得了重要进展的同时仍存在许多问题,但其发展势头和前景良好,尤其在国
内更是如此。首先,有重要需求。从国家层面上看:
一是防治沙漠化,保护和改善生态环境。土地沙漠
化是我国生态环境的主要问题之一,它是由土地风
蚀、风沙流、风沙沉积、沙丘移动和沙尘暴等活动
造成的,其中风蚀是贯穿始终的主要环节,其他是派
生的。过去防治沙漠化研究对派生现象研究较多,
但对主要环节研究偏少。要较好地解决沙漠化问
题,必然要选择风蚀地貌的代表——雅丹进行深
入研究。二是发展旅游业。旅游业已经成为国民
经济的重要产业。雅丹作为干旱区最具魅力的地
质地貌类型之一,是一种不可多得旅游资源。目
前对其开发利用尚处于不能满足人们需要的初
级阶段。要增加新的旅游点和提高其旅游级别
和品位,必然要求对我国雅丹加强调查研究。从
学科发展看:风积地貌研究进展较快,而风蚀地
貌研究相对落后。其次,我国是雅丹地貌的命名
地,雅丹地貌分布广泛,规模宏大,不同发育阶
段和不同类型的雅丹地貌齐全,拥有雅丹地貌
研究得天独厚的资源和天然试验场。我国 21
世纪初以来的雅丹研究热潮仍将持续。

为了抓住这个良机,使雅丹地貌研究取得更
大进展,应突出以下 4 方面研究内容。

(1) 明确科学定义

科学的定义是区分雅丹与其他相似地貌的
关键所在,也是雅丹研究的基础。综合前人对
雅丹的各种定义,为了避免争议和使用交流方
便,对雅丹地貌的定义可分为狭义和广义 2 种。
狭义雅丹地貌是指分布于极端干旱区和部分
干旱区,在第三纪,特别是晚第三纪以来形成
的未完全固结成岩的沉积物上(如河湖相土
状沉积物),因风力和洪水等作用而形成的,具
有相当分布范围和发育规模的,以流线型和
长垄状为主的风蚀地貌,如罗布泊周边、疏勒
河下游和柴达木盆地的雅丹地貌等。广义雅
丹地貌是指发育在时代不同的各种岩性上,由
风力作用为主形成的垄岗状风蚀地貌。这个定
义就像岩溶地貌又称喀斯特地貌一样,实际
上使雅丹地貌等同于风蚀地貌,成为风蚀地
貌的别称或代名词。作者认为真正的雅丹地
貌的内涵应限于狭义雅丹,这样可避免和极
大地减少雅丹与一般风蚀地貌(如与风蚀残
丘、风蚀劣地、岩石雅丹)和丹霞、彩丘甚至
黄土区的水蚀地貌、石灰岩区的喀斯特地貌、
花岗岩区的剥蚀地貌和海岸区的海蚀地貌等
的交叉重叠,能更加清晰地区分这些地貌类
型。

(2) 加强野外监测和室内定量研究

野外观测场应选择具有不同发育条件和阶段的雅丹分布区,对其外营力和内营力进行长期观测。目前,建立雅丹观测场可以首选敦煌雅丹国家地质公园区。这里不仅雅丹规模大,组成物质均为河湖相,而且处于极端干旱区和不同发育阶段。同时该区已辟为旅游景点,交通相对方便,适宜长期居住生活。为了研究内力作用对雅丹形成发育的影响,将来在柴达木盆地也可以选择适当地点建立一个野外观测场。室内研究应充分利用 3S 技术、计算机模拟和现代先进的野外和室内风洞实验技术手段,进行雅丹分布、分类研究,并模拟它的形成条件,内外动力的作用,发生、发展和消亡的全过程,使雅丹研究尽快由形态定性描述研究进入过程和机制定量研究的新阶段。

(3) 突破雅丹形成年代研究瓶颈,深化雅丹与环境关系研究

雅丹地貌形成年代研究,是计算雅丹地区的风蚀速率、风蚀量和沙漠沙源的重要依据,也是研究雅丹形成发育过程与环境关系研究的前提。利用光释光和¹⁴C 等现代先进测年技术手段对雅丹地貌形成年代的绝对年龄测定,将是今后雅丹研究的一个重要突破口。与此同时,采用相关沉积、树轮、文物和历史文献等资料分析其形成发育环境,进而研究地表雅丹形成前的环境变化,深化雅丹与环境关系的认识,使雅丹研究水平得到更大提升。

(4) 加大雅丹地貌研究资助力度

鉴于雅丹地貌研究具有重要的现实意义和理论意义,同时也是风沙地貌学中的研究难点之一。再者,雅丹地貌大多分布在人迹罕至的大漠深处,环境恶劣、交通不便,后勤保障困难。因此所需的仪器装备要求较高,所需研究经费较多,仅凭国家自然科学面上基金等小额资助难以应对,希望国家科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院、国土资源部和国家旅游局等设立专项,甚至联合设置类似“973”的项目予以重点扶持。

参考文献 (References):

- [1] Chen Anze. On the geomorphological classification of sandy conglomerate, and the position and effect in tourism [J]. *Guide of Land Resource*, 2004, 1(1): 11-16. [陈安泽. 论砂(砾)岩地貌类型划分及其在旅游业中的地位和作用[J]. 国土资源导刊, 2004, 1(1): 11-16.]
- [2] Meng Yichen, Su Jianping. Geological tourism resources and their classifications in Gansu province[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*(*Natural Sciences*), 2004, 23(4): 21-24. [孟易辰, 苏建平. 甘肃省旅游地质资源及其分类[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版, 2004, 23(4): 21-24.]
- [3] Young R W, Wray R A L, Young A R M. *Sandstone Landforms* [M]. New York: Cambridge University Press, 2009.
- [4] Cao Jun, Yang Geng. Evaluation of tourist resources in the Lop Nur, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, 29(S2): 235-241. [曹俊, 杨更. 新疆罗布泊旅游资源特征[J]. 四川地质学报, 2009, 29(S2): 235-241.]
- [5] Jiang Hongzhong. Study on ecological and geological values of yardangs, Xinjiang Devils city as a case [J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2004(S1): 9-10. [姜红忠. 雅丹地貌生态地质旅游价值探讨——以新疆哈密魔鬼城为例[J]. 新疆有色金属, 2004, (S1): 9-10.]
- [6] Lin Ying. The master plan for Yadan National Geological Park in Dunhuang, Gansu province [J]. *Chinese Garden*, 2005, 21(2): 75-78. [林鹰. 甘肃敦煌雅丹国家地质公园总体规划[J]. 中国园林, 2005, 21(2): 75-78.]
- [7] Zhao Xingyou, Hu Ruji. Tourism value of wind-erosion landform in Hami Basin [J]. *Arid Land Geography*, 2002, 25(3): 282-285. [赵兴有, 胡汝骥. 哈密盆地风蚀地貌及其旅游价值[J]. 干旱区地理, 2002, 25(3): 282-285.]
- [8] Zheng Benxing, Zhang Linyuan, Hu Xiaohong. Distribution and characteristics of yardang landform and its formation period, west to Yumenguan, Gansu [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1): 40-46. [郑本兴, 张林源, 胡孝宏. 玉门关西雅丹地貌的分布和特征及形成时代问题[J]. 中国沙漠, 2002, 22(1): 40-46.]
- [9] Stapff F M. Karte des unteren Khuisetbals [J]. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 1887, 33: 202-214.
- [10] Walther J. Die Denudation in der Wüste und ihre geologische Bedeutung [J]. *Abhandlungen Sachsische Gesellschaft Wissenschaft*, 1891, 16: 345-570.
- [11] Hedin S. *Central Asia and Tibet* [M]. New York: Scribners, 1903.
- [12] Ward A W, Greeley R. Evolution of the yardangs at Rogers Lake, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(7): 829-837.
- [13] El-Baz F, Breed C S, Grolier M J, *et al.* Eolian features in the Western Desert of Egypt and some applications to Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(B14): 8 205-8 221.
- [14] Greeley R, Bender K, Thomas P E, *et al.* Wind-related features and processes on Venus; Summary of magellan results [J]. *Icarus*, 1995, 115(2): 399-420.
- [15] Grolier M J, McCauley J F, Breed C S, *et al.* Yardangs of the Western Desert [J]. *Geographical Journal*, 1980, 146(Mar.): 86-87.
- [16] Mainguet M. Le Bourkou-Aspects dun modele eolien [J]. *Annales de Geographie*, 1968, 77: 58-66.
- [17] McCauley J F, Grolier M J, Breed C S. Yardangs [C] // Doehring D O, ed. *Geomorphology in Arid Regions*. New York: State University of New York, 1977: 233-269.

- [18] McCauley J F, Grolier M J, Breed C S. Yardangs of Peru and other Desert Regions[M]. USGS Interagency Report: Astrogeology, 1977.
- [19] Trego K D. Yardang identification in magellan imagery of Venus[J]. *Earth Moon and Planets*, 1992, 58(3): 289-290.
- [20] Ward A W. Yardangs on Mars-Evidence of recent wind erosion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(B14): 8 147-8 166.
- [21] Morrison A, Chown M C. Photographs of the Western Sahara from the Mercury Ma-4 satellite[J]. *Photogrammetric Engineering*, 1965, 31: 350-362.
- [22] Halimov M, Fezer F. 8 yardangs types in central-Asia[J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 1989, 33(2): 205-217.
- [23] Goudie A S. Wind erosional landforms: Yardangs and pans[C] //Goudie A S, Livingstone I, Stokes S, eds. *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*. Chichester: Wiley, 1999.
- [24] Brookes I A. Aeolian erosional lineations in the Libyan Desert, Dakhla region, Egypt[J]. *Geomorphology*, 2001, 39(3/4): 189-209.
- [25] Laity J. *Deserts and Desert Environments*[M]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2008.
- [26] Al-Dousari A M, Al-Elaj M, Al-Enezi E, *et al.* Origin and characteristics of yardangs in the Um Al-Rimam depressions (N Kuwait)[J]. *Geomorphology*, 2009, 104(3/4): 93-104.
- [27] Goudie A S. Mega-yardangs: A global analysis[J]. *Geography Compass*, 2007, 1(1): 65-81.
- [28] Gutiérrez-Elorza M, Desir G, Gutiérrez-Santolalla F. Yardangs in the semiarid central sector of the Ebro Depression (NE Spain)[J]. *Geomorphology*, 2002, 44(1/2): 155-170.
- [29] Ritley K, Odontuya E. Yardangs and dome dunes northeast of Tavan Har, Gobi, Mongolia[J]. *GSA Abstracts with Programs*, 2004, 36(4): 33-36.
- [30] Bailey J E, Self S, Wooller L K, *et al.* Discrimination of fluvial and eolian features on large ignimbrite sheets around La Pacana Caldera, Chile, using Landsat and SRTM-derived DEM[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(1): 24-41.
- [31] Bridges N T, Banks M E, Beyer R A, *et al.* Aeolian bedforms, yardangs, and indurated surfaces in the Tharsis Montes as seen by the HiRISE Camera: Evidence for dust aggregates[J]. *Icarus*, 2010, 205(1): 165-182.
- [32] Bridges N T, Geissler P E, McEwen A S, *et al.* Windy Mars: A dynamic planet as seen by the HiRISE camera[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23205.
- [33] Carter L M, Campbell B A, Watters T R, *et al.* Shallow radar (SHARAD) sounding observations of the Medusae Fossae Formation, Mars[J]. *Icarus*, 2009, 199(2): 295-302.
- [34] de Silva S L, Bailey J E, Mandt K E, *et al.* Yardangs in terrestrial ignimbrites: Synergistic remote and field observations on Earth with applications to Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 459-471.
- [35] Edgett K S, Malin M C. New views of Mars eolian activity, materials, and surface properties: Three vignettes from the Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2000, 105(E1): 1 623-1 650.
- [36] Ehsani A H, Quiel F. Application of self organizing map and SRTM data to characterize yardangs in the Lut Desert, Iran[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(7): 3 284-3 294.
- [37] Ekhtesasi M, Sepehr A. Investigation of wind erosion process for estimation, prevention, and control of DSS in Yazd Ardakan Plain[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 159(1): 267-280.
- [38] Harrison S K, Balme M R, Hagermann A, *et al.* Mapping Medusae Fossae Formation materials in the southern highlands of Mars[J]. *Icarus*, 2010, 209(2): 405-415.
- [39] Howard A D. The role of eolian processes in forming surface features of the Martian polar layered deposits[J]. *Icarus*, 2000, 144(2): 267-288.
- [40] Inbar M, Risso C. Holocene yardangs in volcanic terrains in the southern Andes, Argentina[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(6): 657-666.
- [41] Mandt K, de Silva S, Zimbelman J, *et al.* Distinct erosional progressions in the Medusae Fossae Formation, Mars, indicate contrasting environmental conditions[J]. *Icarus*, 2009, 204(2): 471-477.
- [42] Mandt K E, de Silva S L, Zimbelman J R, *et al.* Origin of the Medusae Fossae Formation, Mars: Insights from a synoptic approach[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2008, 113(E12): 1-15.
- [43] Vincent P, Kattan F. Yardangs on the Cambro-Ordovician saq sandstones, North-West Saudi Arabia[J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 2006, 50(3): 305-320.
- [44] Watters T R, Campbell B, Carter L, *et al.* Radar Sounding of the Medusae Fossae Formation Mars: Equatorial ice or dry, low-density deposits? [J]. *Science*, 2007, 318: 1 125-1 128.
- [45] Zimbelman J R, Griffin L J. HiRISE images of yardangs and sinuous ridges in the lower member of the Medusae Fossae Formation, Mars[J]. *Icarus*, 2010, 205(1): 198-210.
- [46] Chen Zongqi. Lop Nur and Lop Desert[J]. *Acta Geographic Sinica*, 1936, 3(1): 19-49. [陈宗器. 罗布淖尔与罗布荒原[J]. *地理学报*, 1936, 3(1): 19-49.]
- [47] Huang Wenbi. Lop Nur Archaeology[M]. Beijing: Peking University Press, 1948. [黄文弼. 罗布淖尔考古记[M]. 北京: 北京大学出版社, 1948.]
- [48] The Lop Nor Comprehensive Scientific Expedition Team, Xinjiang Branch of CAS. The Mysterious Lop Lake[M]. Beijing: Sciences Press, 1985. [中国科学院新疆分院罗布泊综合科学考察队. 神秘的罗布泊[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [49] The Lop Nor Comprehensive Scientific Expedition Team, Xinjiang Branch of CAS. Scientific Investigation and Study of Lop Nor Region[M]. Beijing: Sciences Press, 1987. [中国科学院新疆分院罗布泊综合科学考察队. 罗布泊科学考察与研究[M]. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [50] Dong Zhibao, Qu Jianjun. Instruction for Geomorphologic Map of the Kumtagh Desert[M]. Beijing: Science Press, 2009. [董治宝,

- 屈建军. 库姆塔格沙漠地貌图说明书[M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [51] Li Zhizhong, Zhou Yong, Luo Ruoyu. Recent advances in aeolian geomorphology[J]. *Arid Zones Research*, 1999, 16(2): 61-66. [李志忠, 周勇, 罗若愚. 风沙地貌研究的若干新进展[J]. 干旱区研究, 1999, 16(2): 61-66.]
- [52] Qu Jianjun, Zheng Benxing, Yu Qihao, *et al.* The yardang landform of Aqik Valley in the east of Lop-Nor and its relationship with the evolution of the Kumtagh Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(3): 294-300. [屈建军, 郑本兴, 俞祁浩, 等. 罗布泊东阿奇克谷地雅丹地貌与库姆塔格沙漠形成的关系[J]. 中国沙漠, 24(3): 294-300.]
- [53] Wang Shuai, Ha Si. Advances in the study of geomorphology and process of wind erosion landforms[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2009, 31(1): 100-105. [王帅, 哈斯. 风蚀地貌形态与过程研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(1): 100-105.]
- [54] Yang Geng. On distribution of the yardang in Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, 29(S2): 286-290. [杨更. 新疆雅丹地貌分布特征浅析[J]. 四川地质学报, 2009, 29(S2): 286-290.]
- [55] Ban Gu, Yan Shigu. Han Shu[M]. Beijing: Zhong Hua Press, 2000. [班固, 颜师古. 汉书[M]. 北京: 中华书局出版社, 2000.]
- [56] Masibroda V Y. The aeolian relief of the Turfan Depression and the western Bei-Shan as a reflection of local atmospheric circulation[J]. *Izvestia Akad Nauk Serya Geograf*, 1952, (2): 25-35.
- [57] Gabriel A. The southern Lut and Iranian Baluchistan[J]. *Geographical Journal*, 1938, 92: 193-210.
- [58] Bagnold R A. An expedition to the Gifl Kebir and Uweinat, 1938[J]. *Geographical Journal*, 1939, 93: 281-313.
- [59] Blackwelder E. Yardangs[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1934, 45(1): 159-166.
- [60] Cooke R U, Warren A, Andrew S G. Desert Geomorphology[M]. London: UCL Press, 1993.
- [61] Goudie A S, Stockes S, Cook J, *et al.* Yardang landforms from Kharga Oasis, south-western Egypt[J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 1999, 116(S1): 97-112.
- [62] Laity J. Landforms of aeolian erosion[C]//Abrahams A D, Parsons A J, eds. *Geomorphology of Desert Environments*. London: Chapman & Hall, 1994.
- [63] Breed C S, McCauley J F, Whitney M I, *et al.* Wind erosion in drylands[C]//Thomas D S G, ed. *Arid Zone Geomorphology: Process, form and Change in Drylands*. Chichester: John Wiley, 1997: 453-460.
- [64] Xia Xuncheng. The cause of yardangs landform in Lop Nor region[C]//The Lop Nor Comprehensive Scientific Expedition Team, Xinjiang Branch of CAS, ed. *Scientific Investigation and Study of Lop Nor Region*. Beijing: Sciences Press, 1987: 52-59. [夏训诚. 罗布泊地区雅丹地貌的成因[C]//中国科学院新疆分院罗布泊综合科学考察队. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1987: 52-59.]
- [65] Wu Zheng. Geomorphology of Wind-drift Sands and Their Controlled Engineering[M]. Beijing: Sciences Press, 2003: 111-117. [吴正. 风沙地貌与治沙工程[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 111-117.]
- [66] Huang Keguang, Tang Lezhong. The yardangs in Anxi county[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Sciences)*, 1986, 22(3): 43-47. [黄可光, 汤乐中. 安西县雅丹地貌初探[J]. 西北师范大学学报:自然科学版, 1986, 22(3): 43-47.]
- [67] Fan Xipeng. Geomorphology of northwestern Qaidam Basin near Lenghu[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1962, 28(4): 275-289. [范锡朋. 柴达木盆地西北部冷湖地区地貌概论[J]. 地理学报, 1962, 28(4): 275-289.]
- [68] Lin Rugeng. Preliminary study on farmland desertification in Houshan area, Wulanchabu, Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition)*, 1977, 6(1): 77-89. [林儒耕. 内蒙古乌盟后山地区农田沙化现象的初步研究[J]. 内蒙古师范学院学报:自然科学版, 1977, 6(1): 77-89.]
- [69] Dong Zhibao, Chen Guangting. A preliminary insight into the wind erosion problem in Houshan area of Inner Mongolia[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(2): 84-90. [董治宝, 陈广庭. 内蒙古后山地区土壤风蚀问题初论[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 84-90.]
- [70] Wu Zheng, Wang Wei. Finding and its significance of "old red sand" strata with multiple depositional stages on the coasts of Fujian and Guangdong[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 328-322. [吴正, 王为. 闽粤沿海老红砂多期沉积地层的发现及其意义[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 328-322.]
- [71] Goudie A S. Arid geomorphology[J]. *Progress in Physical Geography*, 1979, 3: 421-426.
- [72] Rosner U. Aolische sedimente und formen als indikatoren der spatpleistozanen bis aktuellen landschaftentwicklung beispiele aus den trochengebiete syriens[J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 1998, 111(S1): 33-50.
- [73] Doornkamp J C, Brunnsden D, Jones D K C. Geology, Geomorphology and Pedology of Bahrain[M]. Norwich: Geo Abstracts, 1980.
- [74] Goudie A S. Wind erosion in deserts[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 1989, 100(1): 83-92.
- [75] Riser J. Le role du vent au cours des derniers millenaires dans le basin Saharien D'Araouane (Mali)[J]. *Bulletin de l'Association de Géographes Francais*, 1985, 62: 311-317.
- [76] Hassan F A, Barich B, Mahmoud M, *et al.* Holocene playa deposits of Farafra Oasis, Egypt, and their palaeoclimatic and geoarchaeological significance[J]. *Geoarchaeology*, 2001, 16(1): 29-46.
- [77] Embabi N S. The Nile Valley and the Western Desert[M]. Cairo: The Egyptian Geographical Society, 2004.
- [78] Breed C S, McCauley J F, Whitney M I. Wind erosion forms[C]//Thomas D S G, ed. *Arid Zone Geomorphology*. London:

- Belhaven Press, 1989; 284-307.
- [79] Krenkel E. Geologie Afrikas[M]. Berlin: Reimer, 1928.
- [80] Corbett I. The modern and ancient pattern of sandflow through the southern Namib deflation basin[C]//Pye K, Lancaster N, eds. *Aeolian Sediments: Ancient and Modern*. London: Blackwell, 1993; 45-60.
- [81] Mainguet M. Le modél des grés: Problèmes Généreaux[M]. Paris: Institut Géographique National, 1972.
- [82] Baker C L. Yardangs in South Dakota badlands[J]. *Bulletin Geological Society of America*, 1951, 62: 1 532.
- [83] Clarke M L, Wintle A G, Lancaster N. Infra-red stimulated luminescence dating of sands from the Cronese basins, Mojave Desert[J]. *Geomorphology*, 1996, 17(1/3): 199-205.
- [84] McCauley J F. Mariner 9 evidence for wind erosion in the equatorial and mid-latitude regions of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78: 4 123-4 137.
- [85] Bosworth T O. Geology of the Tertiary and Quaternary Periods in the Northwest Part of Peru[M]. London: MacMillan, 1922.
- [86] Brookes I A. Geomorphic indicators of holocene winds in Egypt's Western Desert[J]. *Geomorphology*, 2003, 56(1/2): 155-166.
- [87] Fox R W, McDonald A T. Intrduction of Fluid Mechanics[M]. New York: Wiley, 1973.
- [88] Hagedorn H. Untersuchungen uber Relieftypen arider Raume an Beispielen aus dem Tibesti-Gebirge und seiner Umgebung[J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 1971, 11(S1): 1-271.
- [89] Peel R F. Landscape sculpture by wind[C]//21st International Geographical Congress, India, Papers I, 1968: 99-104.
- [90] Hagedorn H. Uber aolische abtragung und formung in der sudest-Sahara[J]. *Erdkunde*, 1968, 22: 257-269.
- [91] Mainguet M. Un etonnant paysage: Les cannelures greseuse du Bembeche (nord du Tchad): Essai dexplication geomorphologique[J]. *Annales de Geographie*, 1970, 79: 58-66.
- [92] Hobbs W H. The erosional and degradational processes of deserts, with especial reference to the origin od desert depressions[J]. *Annals of Association of Amerian Geographers*, 1917, 7: 25-60.
- [93] Whitney M I. Yardangs[J]. *Journal of Geological Education*, 1985, 33(2): 93-96.
- [94] Bohlin B. Notes on the hydrography of Western Kansu[C]//Reports from the Scientific Expedition to the North-Western Provinces of China under the Leadership of Dr Sven Hedin, III Geology. Stockholm: Tryckeri Aktiebolaget Thule, 1940: 54.
- [95] Hoerner H G. The mesa sediments[M]//Wennerholm E, Horin E, eds. *Central Asia Atlas III: The Kansu-Hoshi Corridor and the Suloho-Ochinaho Drainage Regions*. Stockholm: Tryckeri Aktiebolaget Thule, 1980: 114.
- [96] Beadnell H J L. Lake basins created by wind erosion[J]. *Journal of Geology*, 1909, 3: 47-49.
- [97] Haynes C V. Geochronology and climate change of the Pleistocene Holocene transition in the Darb el Arba'in Desert, Eastern Sahara[J]. *Geoarchaeology*, 2001, 16(1): 119-141.
- [98] Washington R, Todd M C, Lizcano G, et al. Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodele Depression, Chad [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(9): L09401.
- [99] Goudie A S. Great Warm Deserts of the World-Landscapes and Evolution[M]. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- [100] Brookes I A. Palaeofluvial estimates from exhumed meander scrolls, Taref Formation (Turonian), Dakhla Region, Western Desert, Egypt[J]. *Cretaceous Research*, 2003, 24(2): 97-104.

Review and Prospect of Yardang Landforms Research

Niu Qinghe, Qu Jianjun, Li Xiaoze, Dong Guangrong, Zhang Kecun, Han Qingjie

(Key Laboratory of Desert and Desertification, Dunhuang Gobi and Desert Research Station, Gansu Center for Sand Hazard Reduction Engineering and Technology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Yardang landforms research is one of the important contents in aeolian erosion landforms research, but it is weaker than Aeolian deposition landforms research at present. Yardang landforms, named by Sweden explorer Sven Hedin in 1903, have been studied over 100 years. Although many scientists made important progress with the technological improvement and methodological update in the history, lots of issues have not been resolved. In this article, the authors summarize the progress and issues in 8 aspects, including scientific definition, spatial distribution, morphology character, formation and evolution conditions and processes, formation chronology, relationship with environments and classifications. Base on the abovementioned, we make research prospects in the future, and give some suggestions, which include clarifying scientific definition, field investigation combined with laboratory quantitative study, breaking research bottleneck of formation chronology, relationship between Yardangs and environments in deep and increasing research fund.

Key words: Yardangs landforms; Quantitative study; Aeolian erosion.