

罗布泊地区雅丹形态特征及演化过程

宋昊泽¹, 杨小平¹, 穆桂金^{2,3}, 秦小光⁴, 林永崇⁵

(1. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;
3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 策勒 848300; 4. 中国科学院
地质与地球物理研究所, 北京 100029; 5. 闽南师范大学历史地理学院, 漳州 363000)

摘要: 雅丹地貌因其多样形态类型长期以来吸引人们的关注, 对其形态特征描述也成为研究热点。作为雅丹地貌形态最早命名地, 罗布泊地区雅丹因其形态的独特性和复杂性闻名, 然而对该地区雅丹形态特征和发育演化过程的深入研究较为缺乏。本文结合野外实测数据和 UAV (小型无人机) 所摄地景影像, 采用地形数字化方法提取地貌原始数据, 选定形态参数后识别测量得到雅丹形态参数数据, 基于以上数据和前人研究成果尝试描述罗布泊地区雅丹形态特征并对该地区雅丹演化过程进行讨论。主要结论有: ① 罗布泊地区雅丹长度集中分布在 20 m 以下, 少有长度 > 160 m, 宽度集中分布在 8 m 以下, 高度多 2 m 以下, 表明区内雅丹个体规模总体较小, 低矮雅丹在数量上占绝对优势; 雅丹长宽比值呈现连续增加的变化过程, 伴随高度的增加长宽比值迅速增大, 由 2:1 逐步增大到 4:1, 并持续升至 10:1 以上, 走向分布集中于 22.5°~67.5°, 与主风向相类似, 雅丹个体平面形态呈现连续变化过程; 雅丹的相邻雅丹数值集中分布在 3~4 个, 平均顶间距分布在 < 20 m 和 40~80 m 区间, 显示罗布泊地区雅丹空间特征的多样性。在个体雅丹形态以外, 初成雅丹和雅丹共基座现象是罗布泊地区主要存在的 2 种复杂化雅丹形态表现。② 罗布泊地区雅丹理想演化模式经历初成期、青年期、成熟期和衰亡期 4 个阶段, 由于存在地层岩性、风力剥蚀、流水作用等控制因素影响, 造就了类型复杂、变化多样的罗布泊地区雅丹形态现状。③ 罗布泊地区雅丹发育具有多期性, 第四纪以来主要存在晚更新世、早全新世、晚全新世和小冰期等 4 个发育期, 结合形态特征和环境演化情况推测龙城和白龙堆雅丹形成于晚更新世, 楼兰北部高大雅丹形成于早全新世, 楼兰中北部雅丹多数形成于晚全新世, 而楼兰地区的低矮雅丹形成于小冰期; 依据地层年代和雅丹高度数据, 计算得到 0.5 ka B.P. 后楼兰遗址附近平均风蚀速率为 6.2 mm a⁻¹。精确描述罗布泊地区雅丹形态特征并探讨其演化过程, 对于了解雅丹形态控制因素影响程度, 深入分析区域风蚀过程具有重要意义。

关键词: 地貌学; 风蚀形态; 雅丹; 罗布泊

DOI: 10.11821/dlxb202109011

1 引言

雅丹 (Yardang) 是一种典型风蚀地貌, 广泛分布于地球干旱、半干旱地区^[1], 在金星和火星也有报道^[2-5]。Hedin 在中国新疆罗布泊地区考察时^[6], 首次借用雅丹一词命名具有“陡峭边缘”特征的风蚀残丘; 稍后 Blackwelder 对雅丹的含义作了阐释和限定^[7], 使

收稿日期: 2021-07-07; 修订日期: 2021-08-24

基金项目: 国家科技基础资源调查专项(2017FY101000) [Foundation: The State Scientific Survey Project of China, No.2017FY101000]

作者简介: 宋昊泽(1993-), 男, 江苏南京人, 博士生, 主要从事第四纪环境演变、风蚀地貌形态等方面的研究。

E-mail: songhaoze@zju.edu.cn

通讯作者: 杨小平(1964-), 男, 宁夏固原人, 教授, 博士生导师, 主要从事沙漠地貌、干旱区环境演变、荒漠化及风沙灾害防治、干旱地区古气候与水资源、绿洲演化等方面的研究。E-mail: xpyang@zju.edu.cn

2187-2202 页

之成为地学学术名词。经过持续研究和讨论,目前一般认为雅丹是发育于基岩、固结或半固结沉积物上的风力侵蚀地貌。

因其形态表现丰富多样,如何准确描述雅丹形态受到持续关注。方法定性描述后^[8-10],学者尝试借助某些形态参数(如长、宽、高等)定量描述雅丹形态^[11-13],其中最重要的成果是Ward通过实地调查和风洞试验提出雅丹理想形态为流线型,其长宽比为4:1;随后的研究侧重扩充形态参数的种类和测量数据量^[14-20],结果显示多数地区的雅丹形态并未表现为流线型,其长宽比变化多样,存在其他控制因素影响雅丹形态。伴随遥感技术的发展,使用小型无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)拍摄地貌景观并建立高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的数字地形数据获取方法逐步得到推广^[21],在此基础上有学者尝试摆脱实地测量的限制,利用数字地形数据提取雅丹形态^[22]。

相较于其他风沙地貌形态,雅丹的发育演化过程一直缺乏系统研究。早期学者关注宏观过程,如Hedin提出流水切割地面后,风沿着流水切割而成的沟谷侵蚀形成雅丹;McCauley等则关注风力侵蚀过程^[10, 23],结合空气动力学理论提出在风力侵蚀过程中磨蚀起到了主要作用;Brookes基于埃及南部雅丹形态的区域差异提出了雅丹发育模式^[15],即伴随风力侵蚀的进行雅丹形态由平行长垄状逐步分解为低矮流线型,这一模式得到了Dong的验证和完善^[19]。由于地表侵蚀过程周期漫长,难以实地反演雅丹演化,因此在结合地表实测数据的基础上,有学者开展数值模拟实验以探讨雅丹发育模式^[24]。

新疆罗布泊地区雅丹地貌分布广泛且形态多样,有利于相关研究的开展^[25-27]。前人工作侧重于雅丹形态的定性描述和类型划分,较少涉及形态特征和发育演化过程的讨论。本文采用野外考察中获得的实测数据,以及分析UAV所摄地景影像制成的DEM,在选定雅丹形态参数的基础上,对罗布泊地区雅丹形态进行测量。利用测量数据初步分析罗布泊地区雅丹形态特征,结合形态控制因素探讨该地区雅丹发育演化过程。以上研究对于探讨雅丹形态控制因素影响程度,深入了解区域风蚀过程具有重要意义。

2 研究区概况

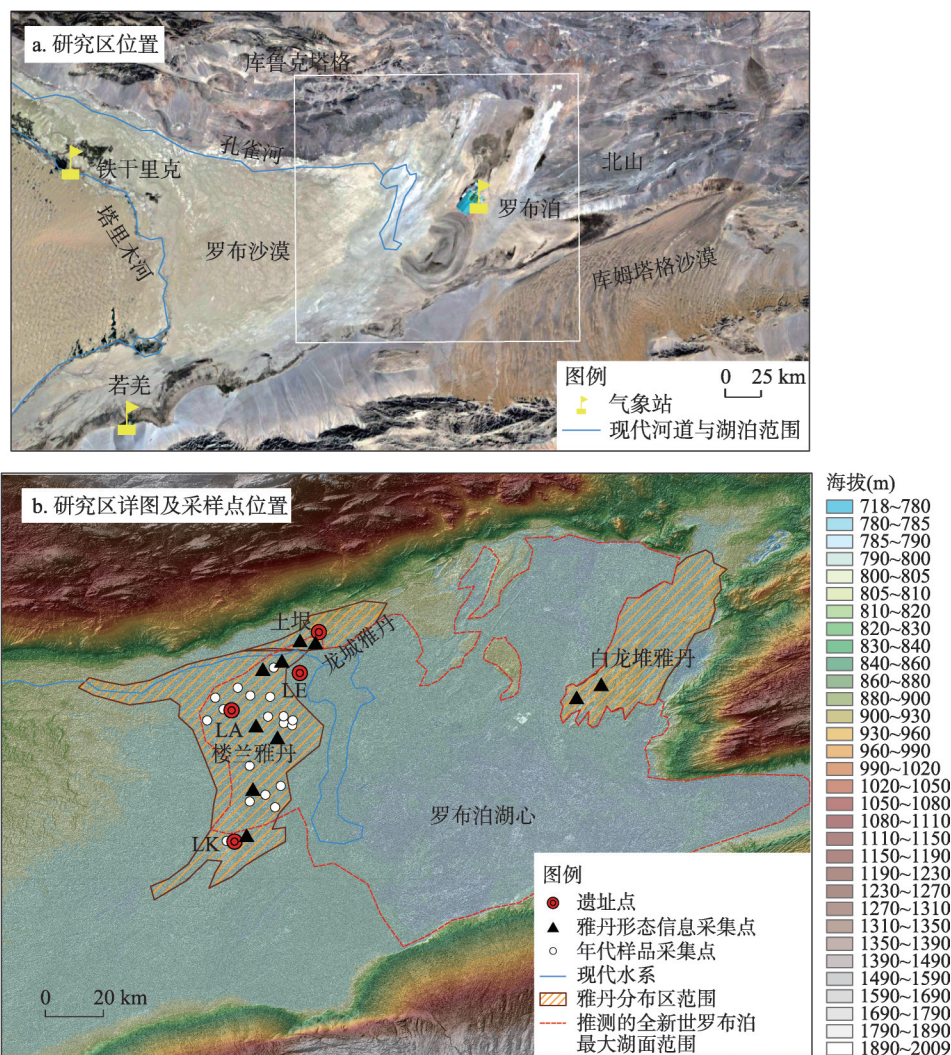
罗布泊地区(39°N~41°30'N, 88°30'E~92°E)位于新疆塔里木盆地东缘,北靠天山支脉库鲁克塔格,南临阿尔金山(图1)。研究区内气候极端干旱,距罗布泊湖心150 km的若羌县年平均气温为11.5℃,多年平均降水量为17.4 mm^[28];春秋季节多大风天气,盛行风向为近东北风^[29];研究区内植被覆盖稀少,仅孔雀河下游近原罗布泊湖滨地带有怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、罗布麻(*Apocynum venetum* Linn.)等耐盐植物的零星分布。

研究区内雅丹主要发育于孔雀河三角洲、白龙堆等地^[30]。2015—2017年野外考察中选取10个雅丹形态典型区开展UAV拍摄工作,其中4个拍摄点位于龙城雅丹分布区和白龙堆雅丹分布区,区内多高大风蚀垄岗分布,地层下界至早更新世;其余6个拍摄点位于楼兰雅丹分布区,区内地势低平,地层主要为全新世河湖相沉积,雅丹较为低矮,高度多在1 m以下^[27]。此外在各雅丹分布区还开展了实地测量工作。

3 数据采集与分析方法

3.1 雅丹形态原始数据数字化采集

罗布泊地区环境恶劣,传统的实地测量不易开展,同时雅丹分布广泛且高度多在1 m



注: 图像来自 Google Earth™; 图b所示范围为图a中方框范围;

图b中现代水系包括孔雀河下游和罗布泊干涸前水面范围, 其中罗布泊已于1972年完全干涸。

图1 研究区地理位置及雅丹形态信息采集点

Fig. 1 Location of the research area and data collection sites in the Lop Nur Lake region

以下, 普通卫星遥感影像的分辨率也难以满足测量要求。UAV 具有易操作、拍摄相片分辨率较高等优点^[31], 利用其拍摄的地景可以开展雅丹形态原始数据规模采集工作^[21]。

经过野外实地调查, 使用 DJ Inspire 1 型无人机对雅丹形态典型区, 按照摄影测量学要求^[32], 在地面布设不少于 5 个参照点后, 开展地景影像拍摄工作, 云台搭载相机型号为 ZENMUSE X3, 航拍飞行高度为 100 m。

在 UAV 拍摄结束后, 采用 Pix 4Dmapper 4.1 软件进行地景正射相片的标定、拼接, 并利用运动恢复 (Structure from Motion) 方法开展数字高程模型的构建^[33], 得到地面分辨率为 0.05 m 的 DEM (图 2), 完成雅丹形态原始数据数字化采集工作。

3.2 雅丹形态参数选取

雅丹形态特征的定量描述需要选取适当的参数进行测量。本文雅丹形态参数的选取

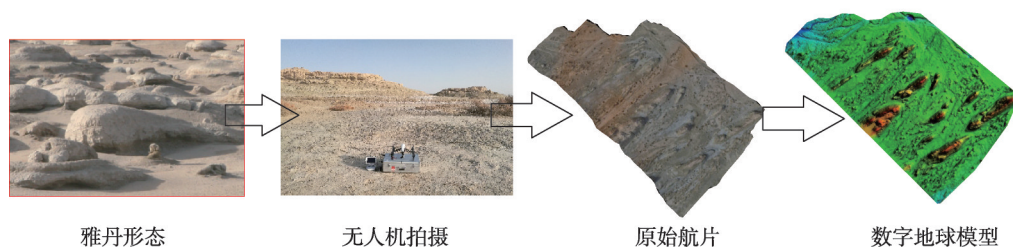


图2 雅丹形态数据数字化采集

Fig. 2 Collection and extraction of yardang morphological data

流程如下：首先总结前人研究中所使用各类参数，其次对这些参数分别从“适合描述研究区雅丹形态”和“便于大范围测量”2个方面开展评价，满足以上条件的参数在经过实验性测量检验其数据代表性后，选取为雅丹形态参数；此外对于未通过评价的部分参数，对其进行适当修改并明确其定义和测量方法后，亦可在经过实验性测量检验后选取为雅丹形态参数（图3）。

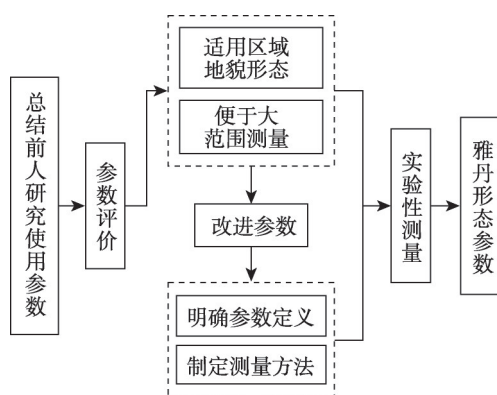


图3 雅丹形态参数选取

Fig. 3 Selection of yardang morphological parameters

长度、宽度和高度作为经典形态参数，分别代表雅丹形态在空间三维方向上的规模。

Mainguet首先使用雅丹长宽比作为形态参数对乍得Borkou地区雅丹进行测量^[34]，经过Ward

等^[22]的研究和论述，长宽比成为区分雅丹形态的参数依据，如长宽比接近4:1时雅丹形态表现为流线型，因此长宽比反映雅丹平面形态的变化；对于雅丹高度，Blackwelder首先认为其可以指示风蚀深度^[9]，随后Halimov等^[14]将高度和长宽比结合对雅丹形态进行分类，并通过高度提出某一形态雅丹所处的发育演化阶段，由此高度可以反映雅丹所受风蚀作用的时间长短；此外结合Goudie的工作^[1]，将原“长宽高比”修改为形高比，即长宽比与高度比值，指示雅丹平面形态与其所受风蚀作用时间长短的关系。

走向和平均坡度亦是常用形态参数。Hedin提出雅丹概念的同时即指出其长轴延伸方向指示盛行风方向^[6]，经过Ward等^[23]的讨论，目前一般认为走向代表风蚀动能集中作用方向，大多数情况下与盛行风方向重合；平均坡度由McCauley引入^[35]，被用于定量描述雅丹迎风面和背风面的陡峭程度，从而讨论雅丹体各部分风动力场状态的差异，因其在研究区内不便于得到测量结果，本文未选择其作为形态参数。

间距是描述雅丹空间分布特征的参数，自Blackwelder提出以来^[9]被众多学者用衡量雅丹间风蚀廊道的宽度，以描述风蚀作用的强度和雅丹空间密度，探讨雅丹发育演化过程。研究区内雅丹间缺乏平行且连贯的廊道分布，难以进行间距测量，因此本文将原参数修改为相邻雅丹数和平均顶间距2个参数。相邻雅丹数定义为某一雅丹的邻近雅丹总数，平均顶间距指某一雅丹与其所有邻近雅丹最高点连线水平距离的平均值，将两者结合起来可以描述缺乏连贯廊道情况下雅丹间距离远近及雅丹空间分布的疏密程度（图4）。

本文从规模、形态和空间特征3个方面选取了8个雅丹形态参数（表1）。

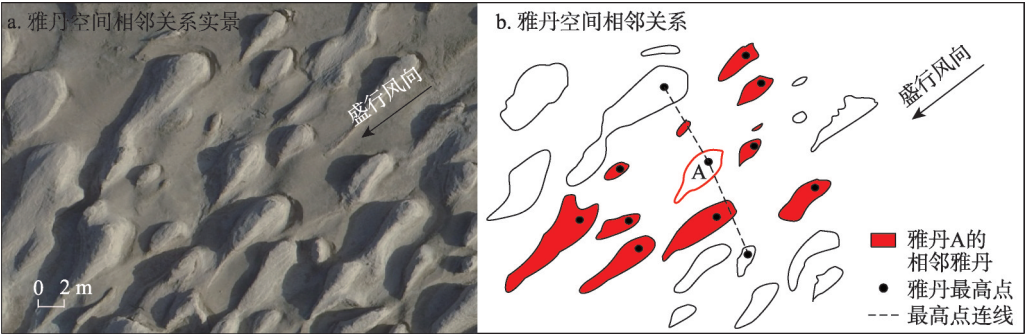


图4 雅丹空间特征形态参数

Fig. 4 Morphological parameters of yardang spacing characteristics

表1 雅丹形态参数名称及指示意义

Tab. 1 Names and definitions of yardang morphological parameters

类别	缩写字母	单位	名称	指示意义
规模特征	L	m	长度(长)	雅丹主延伸方向最大规模
	W	m	宽度(宽)	雅丹垂直主延伸方向最大规模
	H	m	相对高度(高)	风蚀强度及雅丹所受风蚀作用时间的长短
	l	°	走向	风蚀动能集中作用方向 (近似指示盛行风方向)
形态特征	R	—	长宽比	雅丹平面形态
	R_h	—	形高比	雅丹平面形态与其所受风蚀作用时间长短的关系
空间特征	N_{adj}	个	相邻雅丹数	雅丹空间距离及雅丹空间分布密度
	MD	m	平均顶间距	

3.3 雅丹形态识别与区分

在得到雅丹形态数据并确定形态参数后，采用Zhao等的方法^[22]，从DEM上自动识别雅丹形态，同时利用Image-Pro软件对提取的雅丹形态进行参数测量。为了确定以上自动测量方法的误差范围，并检验数据准确性，结合实地测量结果进行数据对比和相对误差计算，相对误差计算方法为：

$$RE = \frac{|Dm - Da|}{Dm} \times 100\%$$

(1)

式中： RE 为相对误差； Dm 为实地测量参数结果； Da 为自动测量方法参数结果。计算结果显示（表2），自动测量方法得到的雅丹长宽高值具有较高准确性，与实测值的相对误差小于10%，长宽高的平均相对误差分别为4.38%、5.75%和5.39%，表明自动测量方法可以得到较为准确的雅丹形态参数数据。

由于研究区雅丹形态多样，存在众多复杂化形态。为了便于测量和分析比较，在雅丹形态识别过程中将雅丹分为个体雅丹（孤立完整形态）和复杂化形态雅丹，形态特征研究主要关注个体雅丹形态。

4 罗布泊地区雅丹形态特征

在研究区内开展大范围的测量工作，共测量了869个个体雅丹和部分复杂化形态雅丹。结合测量数据，从个体规模、个体形态、个体空间特征和复杂化形态表现四个方面描述罗布泊地区雅丹形态特征。

表 2 雅丹形态参数实测值和自动测量值对比及相对误差
Tab. 2 Names and definitions of yardang morphological parameters

类别	YD-1	YD-2	YD-3	YD-4	YD-5	YD-6	YD-7	YD-8	YD-9	Mean
<i>Lm</i>	4.46	60.23	6.02	220.2	20.35	23.8	250.91	286.95	270.4	—
<i>Wm</i>	1.48	7.14	1.3	53.5	6.56	7.94	45.58	54.75	35.92	—
<i>Hm</i>	0.59	4.9	0.89	18.23	4.94	3.5	23.27	26.24	15.75	—
<i>La</i>	4.37	58.17	5.85	211.35	18.59	21.86	243.33	278.39	258.76	—
<i>Wa</i>	1.54	6.76	1.18	49.3	6.26	7.52	43.25	52.8	33.5	—
<i>Ha</i>	0.63	4.5	0.97	19.12	5.14	3.26	23.87	25.62	15.15	—
<i>RE-L</i>	2.02	3.42	2.82	4.02	8.65	8.15	3.02	2.98	4.30	4.38
<i>RE-W</i>	4.05	5.32	9.23	7.85	4.57	5.29	5.11	3.56	6.74	5.75
<i>RE-H</i>	6.78	8.16	8.99	4.88	4.05	6.86	2.58	2.36	3.81	5.39

注：*Lm*、*Wm*和*Hm*分别表示长宽高的实测值，*La*、*Wa*和*Ha*分别表示长宽高的自动测量值，*RE-L*、*RE-W*和*RE-H*分别表示长宽高的相对误差，所有测量值单位均为m。

4.1 个体规模

长度测量数据结果表明（图 5a），长度变化范围在 0.49 m 至 293.51 m 之间，其中长度在 20 m 以下的雅丹占测量总数的 40.05%，在 20~40 m 区间的雅丹占测量总数的 15.54%，位于 40~60 m 和 60~80 m 区间的雅丹分别占 13.58%、8.86%，有 191 个雅丹的长度 > 80 m。长度均值为 48.98 m，远小于柴达木盆地（均值 105.82 m）^[21]和库姆塔格沙漠地区（北区均值 266 m；南区均值 139 m）^[19]，标准差为 51.77，显示罗布泊地区雅丹长度较小但区域变化多样，在小雅丹占多数的情况下仍有相当数量线状或垄状雅丹的分布。值得注意的是，罗布泊地区雅丹长度测量极大值也显著小于其他地区，这一表现可能与雅丹形态识别和测量方法差异有关。

宽度测量数据结果表明（图 5b），宽度的变化范围在 0.17 m 至 17.16 m 之间，其中宽度在 20 m 以下的雅丹占测量总数的 14.73%，在 2~4 m 区间的雅丹占 8.86%，位于 4~6 m 和 6~8 m 区间的雅丹分别占 6.67%、4.6%，12.43 % 的雅丹宽度 > 8 m。宽度均值为 4.89 m，

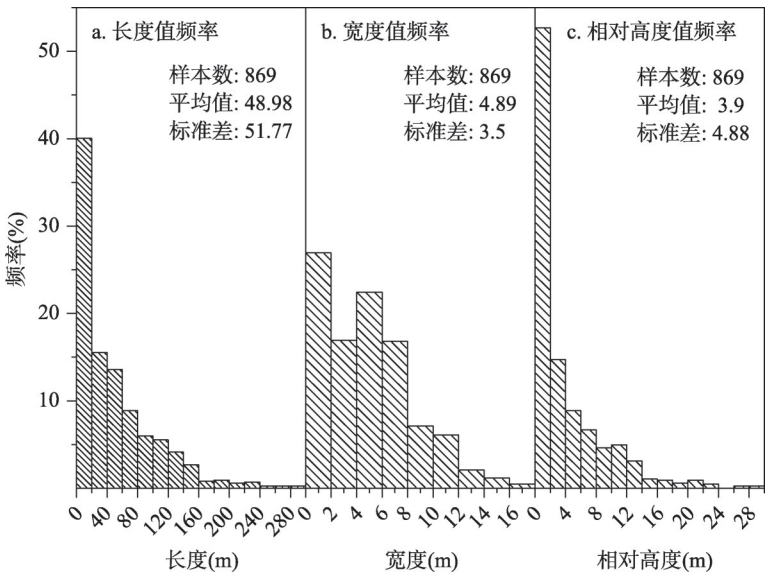


图 5 罗布泊地区雅丹个体规模特征
Fig. 5 Characteristics of yardang size in the Lop Nur Lake region

标准差为3.5,表明罗布泊地区雅丹宽度普遍较小,多在8 m以下,同时标准差远小于长度,反映雅丹宽度值分布较长度集中。

相对高度测量数据统计结果显示(图5c),高度的变化范围在0.05 m至28.9 m之间,其中高度在20 m以下的雅丹占测量总数的52.7%,在2~4 m区间的雅丹占14.73%,位于4~6 m和6~8 m区间的雅丹分别占8.86%、6.67%,148个雅丹的高度>8 m。高度均值为3.9 m,标准差为4.88,显示罗布泊地区雅丹总体较为低矮,但雅丹高度测量极大值为28.9 m,超过了野外实测极大值(楼兰23 m;白龙堆25.6 m),表明在低矮雅丹占绝对优势的罗布泊地区,依然存在规模较大的雅丹个体。

4.2 个体形态

雅丹走向频率图显示(图6),罗布泊地区雅丹走向分布高度集中,主要分布在22.5°~67.5°区间。雅丹形态主延伸方向与罗布泊地区北东和北东北的主风向相一致,反映了风蚀过程对雅丹形态发育和演变的重要影响。

通过长宽比测量结果观察(图7a),罗布泊地区雅丹长度和宽度变化趋势近似幂函数曲线,表现为长度快速增加的同时宽度变化缓慢。这种趋势导致雅丹长宽比由2:1逐步变为4:1并持续增大至10:1及以上,显示罗布泊地区雅丹平面形态呈现连续变化过程,而这一过程主要受到长度改变的影响。

从形高比测量结果可以看出(图7b),长宽比随高度的变化趋势不是线性的,趋势

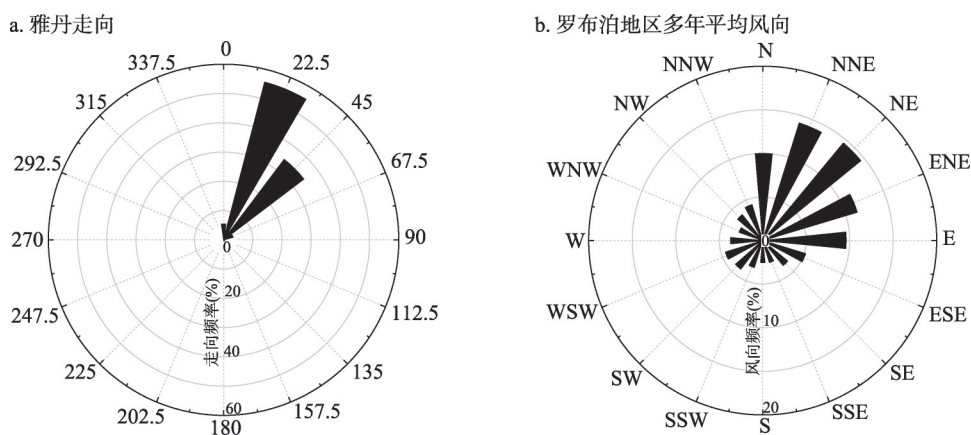


图6 雅丹走向频率与罗布泊地区多年平均风向风玫瑰图^[27]

Fig. 6 Frequency of yardang's orientations and wind rose in the Lop Nur Lake region

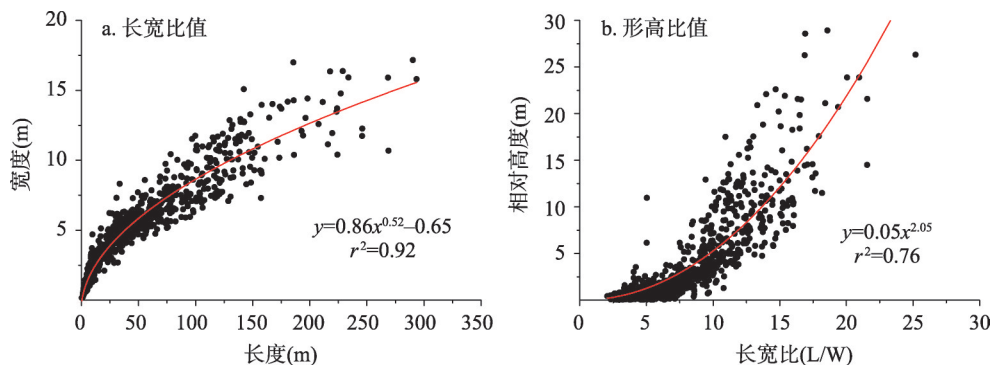


图7 雅丹长宽比与形高比测量结果

Fig. 7 The plots of length vs. width and length/width vs. height

拟合结果接近二次函数曲线,即随着长宽比的增大雅丹高度迅速变化,长宽比为2:1时高度基本在1 m以下,长宽比变为4:1时高度在1.5 m左右,而长宽比为10:1时高度变化范围扩大,集中于4~5 m左右。高度指示雅丹所受风蚀作用时间的长短,一般认为高大雅丹较低矮雅丹经受更长时间的风蚀作用,形高比测量结果变化趋势刻画了持续风蚀作用下罗布泊地区雅丹形态变化过程:个体雅丹形成初期,形态接近圆丘(长宽比2:1);随着风蚀进行,雅丹长度和宽度的变化趋势出现差异,形态逐渐变为鲸背状或水滴状(长宽比4:1);当风蚀作用继续深入,雅丹长度迅速拉长,而宽度受到风蚀限制变化缓慢,形态向长垄状转变(长宽比可> 10:1)。

4.3 空间特征

从相邻雅丹数测量结果可以看出(图8a),罗布泊地区雅丹的相邻雅丹数值变化范围为1~11个,集中分布区间为3~4个。相邻雅丹数平均值为3.87个,标准差为1.49,表明罗布泊地区雅丹的相邻雅丹数适中且区域变化较小。

平均顶间距测量结果表明(图8b),罗布泊地区雅丹平均顶间距变化范围为3.34 m至213.24 m,平均值为58.91 m,标准差为45.68,表明区域内雅丹较为接近,雅丹间的风蚀廊道或风蚀洼地宽度较窄,但区域差异较大;平均顶间距数值集中分布于两个区间:雅丹平均顶间距在< 20 m的雅丹占测量总数的29.81%,位于40~80 m的占39.3%,而雅丹平均顶间距> 80 m的雅丹仅占测量总数的16.7%。

结合相邻雅丹数和平均顶间距的测量结果,罗布泊地区雅丹存在两种空间特征:一是雅丹间距离较近,空间分布较密集;二是雅丹之间距离较远,空间分布相对稀疏。以上特征与野外考察及影像观察的结果一致,显示罗布泊地区雅丹空间特征的多样性。

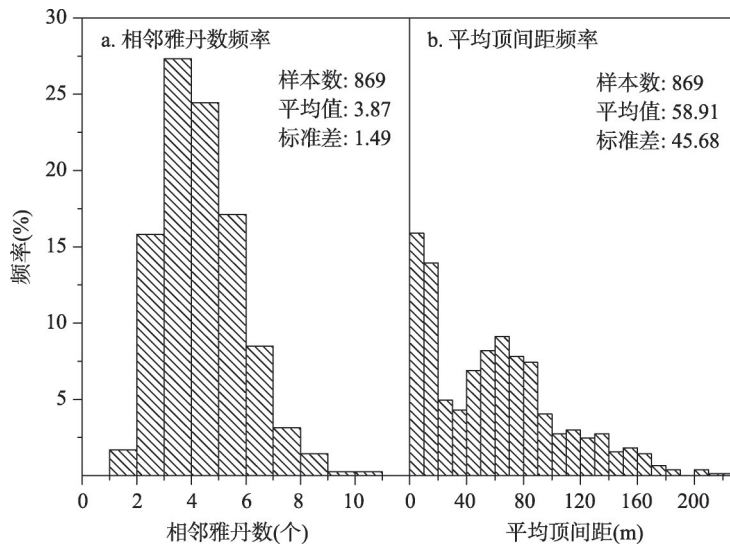


图8 雅丹形态空间特征

Fig. 8 Characteristics of yardang's spatial distribution

4.4 复杂化形态表现

在个体雅丹形态以外,罗布泊地区雅丹主要存在2种复杂化形态表现:①初成雅丹,②雅丹共基座现象。

在雅丹形态识别过程中,观察到原先认为的平整风蚀面上实际存在众多突起的小风蚀体,这些风蚀体形态与雅丹相似多为流线状,但由于风蚀体间的风蚀廊道不明显,难以分离出个体形态,故将这些突起称为初成雅丹。初成雅丹的规模和形态都较小,无法

进行自动识别和测量分析其形态特征。野外考察发现,初成雅丹规模变化很大,12个实测值显示长度变化范围为0.1~9.4 m,高度一般较低,普遍在0.5 m以下;形态上多表现为流线状和线状,长宽比为2:1~6:1;空间分布多呈现定向排列,雅丹间被不连续的风蚀廊道所分隔,同时前后雅丹的头尾部分常常不存在明显的界限。由于初成雅丹主要分布在同一风蚀面上,空间分布受到风蚀面大小的限制,一般呈片状分布。

通过高分辨率DEM,发现线状或长垄状雅丹顶部普遍存在多个风蚀体,这些风蚀体呈流线状并分布在同一平台面,平台面以下为陡崖或陡坡。若将风蚀体所在平台面以下的原线状或长垄状雅丹部分视为基座体,则与初成雅丹类似这些风蚀体可以被视为雅丹,这种数个雅丹分布在同一基座体的现象即为雅丹共基座现象^[36]。经过前期对51个基座体和其上123个雅丹的测量研究,基座体以上雅丹的规模、形态和空间特征均与流线状个体雅丹相似,长宽比集中3:1~5:1之间,而基座体则基本保持了原线状或长垄状雅丹的规模、形态和空间特征,其中基座体高度在0.5~20 m范围内均有分布,两者形态的巨大差异反映线状或长垄状雅丹是一种复合雅丹形态,其各部分形态存在不同的风蚀演化过程。

5 罗布泊雅丹演化过程

雅丹形态特征与雅丹所处发育阶段有着密切的联系,形态特征分析有助于雅丹演化过程的探讨。在充分考虑地貌形成控制因素的同时,结合罗布泊雅丹形态数据,提出罗布泊地区雅丹可能的演化过程,并通过其他地区雅丹形态的比较讨论罗布泊雅丹演化的独特性。

5.1 控制因素

地貌形态变化受构造活动(岩性)、外营力作用(风化、流水剥蚀)与时间3个因素的影响,罗布泊地区雅丹地貌的形成和演化的主要控制因素为地层岩性和风力、流水剥蚀等。

地层岩性直接影响雅丹发育及其形态表现。前人研究显示发育在年轻河湖相地层上的雅丹规模较小,形态呈流线状,而发育于较老地层或基岩上的雅丹多为高大长垄状形态^[37]。罗布泊雅丹分布地区地层沉积物类型多样:龙城雅丹分布区存在两期地层,分别为底部富石膏的砂质泥岩和其上的灰绿色粉砂、深棕色泥岩,由于石膏含量的不同,两期地层存在岩性软硬差异;白龙堆雅丹分布区主要为富钙芒硝的湖相地层,据野外观察该地层呈水平产状且质地较为均一,夹有薄层黄色细粉砂^[27];楼兰LA遗址雅丹地层剖面显示,楼兰雅丹分布区地层主要由晚更新统一全新统河湖相沉积物组成,分为较粗的砂质粉砂层和较细的含黏土粉砂层,前者较为疏松而后者相对坚硬^[28]。由于地层沉积物类型多样,导致罗布泊地区雅丹地貌形态区域变化显著,如位于早期地层上的龙城和白龙堆雅丹分布区,雅丹多为高大垄状形态,而位于晚更新统一全新统河湖相地层上的楼兰雅丹分布区,则多低矮流线状小雅丹;同时由于抗风蚀能力的差异,软硬沉积层交替出现的沉积物特征会导致差异性风蚀,随着风蚀下切的深入,原先位于地面的雅丹逐渐被陡坡和陡崖分隔开,从而形成在龙城和楼兰雅丹分布区均普遍出现的雅丹共基座现象。

风力剥蚀是雅丹形成的主要因素,风从四个方面影响雅丹的发育及其形态表现:跃移质和悬移质颗粒磨蚀,风力吹蚀以及由气流运动导致的侵蚀^[38-40]。在野外观察中注意到,罗布泊地区初成雅丹附近的风蚀洼地中常覆盖有细砂,由于初成雅丹高度多在0.5 m以下,处于跃移质颗粒磨蚀的作用范围,表明初成雅丹的形成与跃移质颗粒磨蚀作用密

切相关,跃移质颗粒磨蚀下切地表是该地区雅丹形态发育的初始动力;随着初成雅丹的形成,雅丹间风蚀廊道开始出现,此时风力吹蚀作用破坏软硬交替沉积地层中的疏松部分,加速风蚀下切,使雅丹高度不断增加;罗布泊地区春秋季节多大风天气,随风带来的悬移质颗粒会对雅丹上部产生磨蚀,减小顶部风蚀面,进而改变其形态;气流流经雅丹表面所产生的旋涡和二次流会持续侵蚀雅丹表面,限制其宽度使其形态不断拉长,同时还会加速雅丹尾部的侵蚀崩塌,造成雅丹形态的破碎瓦解。

早期众多研究已关注到流水作用对雅丹发育的重要影响。夏训诚认为龙城雅丹分布区长垄状雅丹的形成与冲洪积扇洪水的冲刷密切相关,并据此将雅丹地貌分为风蚀形成为主、流水侵蚀形成为主和风蚀流水共同形成3种类型^[41]。综合野外观察结果,流水作用可能从3个方面影响罗布泊地区雅丹形态:①促进了雅丹间风蚀廊道的形成,考察中发现在楼兰雅丹分布区,雅丹间风蚀洼地内常存在临时滞水痕迹,这些洼地间有通道连接,在强风条件下这些临时滞水会被吹起并在风蚀洼地间流动,出现“风吹水”现象。“风吹水”现象结合了风力和流水侵蚀作用,加快风蚀下切地面速度并造成风蚀洼地沿盛行风方向延伸,形成平行定向排列的雅丹空间分布特征;②对雅丹形态的切割,在雅丹共基座现象中,基座体平面和陡崖上常见流水冲沟,这些冲沟逐步侵蚀地层,使基座体不断被分割变小,最终由长垄状逐步变为堡状或柱状形态;③由洪水导致的河流改道对雅丹空间分布的改变,楼兰雅丹分布区位于孔雀河尾间,上游来水增加时易形成洪水,造成河流改道。洪水所携带的沉积物将低矮雅丹完全掩埋,洪水退去后地面仅残留部分较高大雅丹,随后新堆积的洪水沉积物表面开始接受风蚀作用,逐步形成新的低矮雅丹,使该地区雅丹呈现孤立高大个体被众多小雅丹环绕的空间分布格局,这一现象在野外剖面中也有报道^[42]。

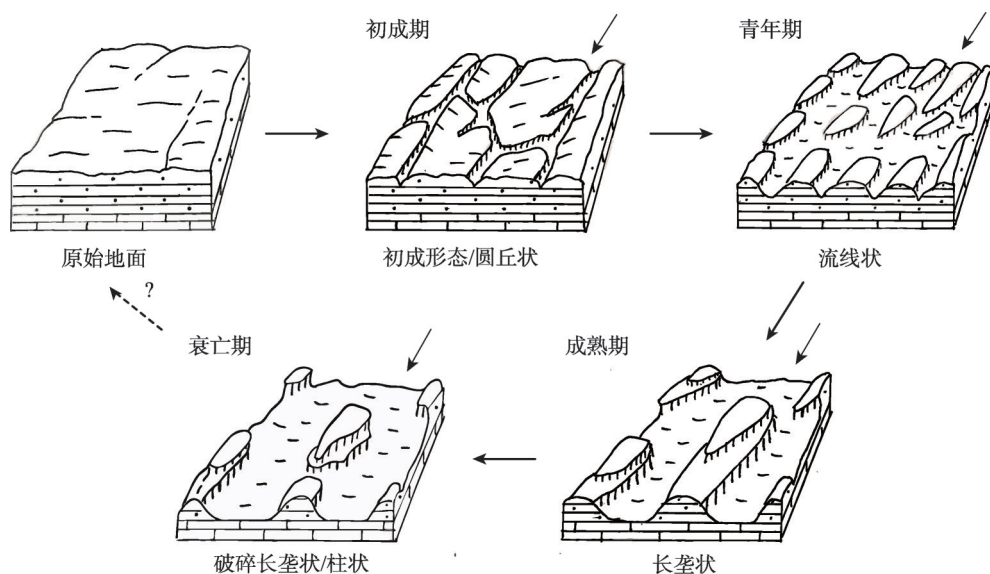
5.2 雅丹演化过程

罗布泊地区雅丹的形成和演化主要受风力剥蚀及其作用时间的控制,同时受到地层岩性和流水作用的影响。夏训诚认为罗布泊地区雅丹经历了表面风化破坏、雏形雅丹形成、雅丹地貌形成和地貌消失等4个阶段^[27]。结合雅丹形态数据、演化控制因素和前人研究成果,本文提出以下罗布泊地区雅丹理想演化模式(图9)。

初成期:这一时期雅丹长宽比集中分布在1:1至3:1范围内,顶间距多在20 m以下。由于地表风化作用和“风吹水”现象,原本较为平坦的地面出现裂隙,盛行风沿裂隙持续侵蚀,使之不断展宽和加深,形成风蚀廊道雏形,地面开始起伏不平;雅丹形态多为初成雅丹形态,空间分布呈片状,已形成个体形态的雅丹表现为圆丘状(长宽比2:1),高度基本在1 m以下,分散出现在初成雅丹形态间。

青年期:这一时期雅丹长宽比集中分布在3:1至5:1范围内,顶间距变化范围在20~40 m。随着风蚀下切的进行,雅丹间风蚀廊道持续加深展宽,多数初成雅丹形态经过消失重组逐步转变为个体雅丹。雅丹形态主要为理想的流线状(长宽比4:1),高度在1~3 m左右,总体仍较为低矮。由于雅丹间距较小,雅丹空间密度在这一时期达到最大值。

成熟期:这一时期雅丹长宽比在5:1至10:1范围内,顶间距变化范围在40~90 m。又称风蚀垄岗期,当风蚀作用切穿雅丹间风蚀廊道或风蚀洼地(地层中相对抗风蚀层)后,风蚀快速发展,在流线状雅丹周围形成风蚀陡坎。由于风蚀陡坎对雅丹宽度的限制,随着风蚀的继续进行,雅丹形态不断拉长,由流线状转变为长垄状,高度多在5 m以上。在这一形态转变过程中,风蚀陡坎的形成和垄岗发育起主要作用,青年期形成的流线状雅丹被保留在风蚀陡坎之上,其形态变化较小。这一时期伴随风蚀洼地的加深和展宽,雅丹间距迅速增加,造成雅丹空间密度的下降。



注: 演化阶段图示右上角箭头表示主风向。

图9 罗布泊地区雅丹演化理想模式

Fig. 9 The ideal process of yardang's evolution in the Lop Nur Lake region

衰亡期: 这一时期雅丹长宽比多在10:1以上, 顶间距超过90 m, 并出现部分孤峰形态雅丹(长宽比 $< 10:1$ 且高度 > 5 m)。由于存在持续的跃移质物质磨蚀, 雅丹头部不断坍塌后退, 同时受到二次流的影响, 雅丹两翼和尾部逐步被侵蚀崩塌, 脊部的缓坡变为尖锐脊线, 雅丹整体形态发生破碎。雅丹间风蚀廊道和风蚀洼地进入缓慢发育阶段, 雅丹之间的距离增大变缓, 空间分布较为稀疏且保持相对稳定。

与其他地区相比, 罗布泊地区雅丹演化基本遵循风蚀地貌发育一般规律, 同时具有自身特点。埃及南部雅丹在初成期即被平行风蚀沟分割, 由线状发育为长垄状后, 最终演化为残丘形态^[15]; 柴达木盆地雅丹初期受风力和流水双重作用表现为方山或犬牙状形态, 随着风蚀进行最终变为低矮流线状^[14]; 库姆塔格沙漠雅丹形态则呈现片状-长垄状-孤峰/犬牙状的演化过程^[19]。罗布泊地区雅丹初成期形态与库姆塔格沙漠雅丹类似, 多以片状初成形态表现, 但青年期形态特征与其他地区不同, 雅丹规模依然较小且为流线状形态, 并未直接变为长垄状, 这一特征与地区广泛分布的软硬相间地层有关, 在风蚀未切穿青年期雅丹以下坚硬地层时, 水平方向雅丹形态会逐步向理想流线状转变, 但垂直方向由于风蚀深度有限难以形成高大雅丹, 因此罗布泊地区雅丹形态难以由初成片状直接变为长垄状。罗布泊地区雅丹成熟期形态与其他地区类似, 其特点在于流线状雅丹和垄岗的组合, 而衰亡期雅丹形态并未完全表现为孤峰、残丘形态, 存在众多高度降低和形态破碎的长垄状雅丹与孤峰形态并存。

在风力剥蚀及其作用时间控制因素以外, 由于地层岩性和流水作用的影响, 雅丹形态发育会偏离理想演化模式, 造成罗布泊地区雅丹形态表现进一步复杂化。首先软硬沉积层交替的地层岩性会导致差异性风蚀, 形成雅丹共基座现象; 其次是流水作用对雅丹形态的切割, 使长垄状雅丹被逐步分离变为堡状或柱状; 最后洪水携带的沉积物将低矮雅丹掩埋, 终止了这些雅丹的演化进程, 使处于不同演化阶段的未掩埋高大雅丹和后期再次形成的低矮雅丹在同一区域共存。

5.3 雅丹形成年代和地区风蚀速率

雅丹形成年代主要依靠实地调查和观测现代风蚀速率间接推测、获取雅丹地貌顶部的地层年代、利用雅丹地区文物测年推断和结合区域地质历史时期气候变化间接判断等方法估算^[43]。Hedin利用雅丹地层中的文物年代和雅丹高度^[44]，认为罗布泊地区雅丹形成于1.5 ka B.P.，风蚀速率为 4 mm a^{-1} ；Hörner结合遗址年代^[45]，估算风蚀速率为 2 mm a^{-1} ；Hoerner和Bohlin分别对罗布泊和敦煌地区雅丹附近细砂中的陶片进行 ^{14}C 定年，认为以上地区的中型雅丹在1.5—2 ka B.P.开始形成^[43]；郑本兴通过确定雅丹地层中砾石上覆层的年龄，认为三垄沙雅丹地貌的发育不早于中更新世晚期^[29]；夏训诚依据楼兰LA古城附近残存文化层高度，计算遗址附近6个点的风蚀深度，得到平均风蚀速率为 3.6 mm a^{-1} ，由此推测该地雅丹形成历史不超过千年^[27]。Dong结合雅丹顶部地层光释光年龄和推算的风蚀速率（约 3 mm a^{-1} ），推测库姆塔格沙漠雅丹最早形成于6—7 ka B.P.^[19]。

由于罗布泊地区雅丹基本发育在河湖相地层之上，地层剖面中河湖相沉积以上若存在侵蚀面可视为雅丹地貌发育的标志，此外古绿洲或人类活动层亦指示风蚀前地层位置和年代，由此通过相关地层年代分析可以推测雅丹地貌形成年代。结合前人工作，本文认为罗布泊雅丹发育具有多期性特点，第四纪以来存在以下4个主要发育期。

晚更新世发育期（90 ka B.P.）：依据形态特征判断，龙城雅丹和白龙堆雅丹发育已进入成熟期和衰亡期，其雅丹地貌形成时间要早于罗布泊其他区域。王富葆在对龙城雅丹地层开展光释光测年工作中^[46]，测得雅丹上部灰绿色粉砂、深棕色泥岩年龄为 $(90.8 \pm 5.6) \text{ ka B.P.}$ ，雅丹下部富石膏的砂质泥岩年龄为 $(135.6 \pm 7.5) \text{ ka B.P.}$ ，由此推断该地雅丹形成年代不早于90—135 ka B.P.；王弭力等研究测得白龙堆雅丹地层下部热释光年龄为 $(138.2 \pm 1.11) \text{ ka B.P.}$ ，地层顶部热释光年龄为 $(97.7 \pm 0.76) \text{ ka B.P.}$ ^[47]，推测雅丹形成年代与龙城雅丹相近。综合以上工作，在90 ka B.P.前后罗布泊达到一期高湖面后，存在一次大范围雅丹发育过程，主要发育区域为罗布泊北侧和东侧湖积台地，即现龙城和白龙堆雅丹分布区。

早全新世发育期（8—9 ka B.P.）：楼兰LA古城佛塔遗址附近剖面光释光年龄显示^[48]，7.15—10.13 ka B.P.存在沉积间断，指示湖水面积退缩的干旱时期，而剖面顶部年龄为4.69 ka B.P.，表明该时期后湖水再次退出且再未恢复；此外罗布泊K1钻孔显示9 ka B.P.前后沉积物中值粒径出现一次变粗过程^[47]。由此推测8—9 ka B.P.前后存在一次雅丹发育期，主要发育区域为楼兰遗址附近的湖积台地，但由于4.69 ka B.P.以前该地存在湖面反复进退，本时期形成的雅丹多数已被后期沉积物覆盖，仅有楼兰遗址北部高大雅丹残存。

晚全新世发育期（1.6 ka B.P.）：一般认为由于水系变化，楼兰LA古城在1.6 ka B.P.前后荒废，此后随着风蚀发展，在原先人类活动地层上形成雅丹。东晋时期僧人法显前往西域时，描述罗布泊地区环境为“沙河热风”“崎岖薄脊”，此后隋唐时期的裴矩、玄奘等人亦有类似记述^[49]，表明魏晋以后罗布泊地区自然环境已十分恶劣，同时有雅丹地貌的产生。结合楼兰地区雅丹形态特征，推测1.6 ka B.P.为一次雅丹发育期，主要发育区域为楼兰遗址周边人类活动区，现楼兰地区中北部的雅丹多数为这一期发育产物。

小冰期发育期（0.5 ka B.P.）：Li和林永崇对楼兰地区不同地点低矮雅丹顶部植物残体的 ^{14}C 测年数据表明^[50-51]，在0.45—0.65 ka B.P.普遍存在一期古绿洲，此后再无广泛绿洲的出现^[52]。雅丹顶部植物残体可以指示风蚀前古绿洲地面所在位置，由此推测0.5 ka B.P.前后出现最近一次雅丹发育过程。因为风蚀作用时间短暂，雅丹形态演化多数处于初成和青年期，现楼兰地区的低矮雅丹基本形成于这一时期。

由于雅丹发育的多期性和湖面进退、洪水堆积等因素的干扰，以当前雅丹高度和地

层年代推测侵蚀速率存在偏差。本文选取年代样品采集点附近21个低矮雅丹, 计算得到平均高度为3.1 m, 结合最近一期古绿洲面年代, 得到0.5 ka B.P.后楼兰遗址附近平均风蚀速率为 6.2 mm a^{-1} , 远大于夏训诚的计算结果。该结果表明, 罗布泊地区风蚀速率可能大于原先估计, 雅丹发育的多期性和其他因素会影响该地区风蚀速率的计算, 从而影响雅丹形成年代和演化过程的讨论。

6 结论

基于野外实测数据和UAV所摄地景影像, 采用地形数字化提取方法, 在测量得到雅丹形态参数数据后, 本文尝试描述了罗布泊地区雅丹形态特征, 并对该地区雅丹演化过程进行探讨, 主要结论如下:

(1) 罗布泊地区雅丹长度集中分布在20 m以下, 宽度集中分布在8 m以下, 高度多在2 m以下, 区内雅丹个体规模总体较小, 低矮雅丹在数量上占绝对优势, 但高大雅丹仍有分布; 随着长度、宽度增加, 雅丹长宽比值呈现连续变化过程, 随着高度的增加, 长宽比值迅速增大, 由2:1逐步增大到4:1, 并升至10:1以上, 走向分布集中 $22.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$ 区间, 与主风向一致; 雅丹的相邻雅丹数集中分布在3~4个区间, 平均顶间距集中分布在 $< 20 \text{ m}$ 和40~80 m, 区内雅丹空间特征的差异, 显示罗布泊地区雅丹空间特征的多样性。在个体雅丹形态以外, 初成雅丹和雅丹共基座现象是罗布泊地区主要存在的两种复杂化雅丹形态表现。

(2) 罗布泊地区雅丹的理想演化模式经历初成期、青年期、成熟期和衰亡期四个阶段, 但是由于地层岩性、风力剥蚀、流水作用等控制因素的影响, 造就了类型复杂、变化多样的罗布泊地区雅丹形态现状。

(3) 罗布泊地区雅丹发育具有多期性, 第四纪以来主要存在晚更新世、早全新世、晚全新世和小冰期等4个发育期, 结合形态特征和环境演化情况推测龙城和白龙堆雅丹形成于晚更新世, 楼兰北部高大雅丹形成于早全新世, 楼兰中北部雅丹多数形成于晚全新世, 而楼兰地区的低矮雅丹形成于小冰期; 依据地层年代和雅丹高度数据, 计算得到0.5 ka B.P.后楼兰遗址附近平均风蚀速率为 6.2 mm a^{-1} 。

参考文献(References)

- [1] Goudie A S. Mega-yardangs: A global analysis. *Geography Compass*, 2007, 1(1): 65-81.
- [2] Trego K D. The absence of yardangs on Venus. *Earth, Moon, and Planets*, 1990, 49(3): 283-284.
- [3] Trego K D. Yardang identification in Magellan imagery of Venus. *Earth, Moon, and Planets*, 1992, 58(3): 289-290.
- [4] Ward A W. Yardangs on Mars: Evidence of recent wind erosion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84 (B14): 8147-8166.
- [5] Li Lulu, Dong Zhibao, Li Chao, et al. Comparison of yardang morphology on the Earth and the Mars: Taking the Elysium Planitia and the Qaidam basin for an example. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(4): 716-723. [李露露, 董治宝, 李超, 等. 火星和地球雅丹形态学类比分析: 以埃律西昂平原和柴达木盆地为例. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 716-723.]
- [6] Hedin S. *Central Asia and Tibet*. London: Hurst and Blackett, 1903.
- [7] Blackwelder E. Yardang and zastruga. *Science*, 1930, 72(1868): 396-397.
- [8] Chen Zongqi. Lop Nur and Lop desert. *Acta Geographica Sinica*, 1936, 3(1): 19-49, 246. [陈宗器. 罗布淖尔与罗布荒原. *地理学报*, 1936, 3(1): 19-49, 246.]
- [9] Blackwelder E. Yardangs. *Geological Society of America Bulletin*, 1934, 45(1): 159-166.
- [10] McCauley J F. Mariner 9 evidence for wind erosion in the equatorial and mid-latitude regions of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(20): 4123-4137.

- [11] Fan Xipeng. Geomorphology of northwestern Qaidam Basin near Lenghu. *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. *地理学报*, 1962, 28(4): 275-289.]
- [12] Mainguet M. Le Borkou: Aspects d'un modelé éolien. *Annales de Géographie*, 1968, 77(421): 296-322.
- [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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1979, 84(B14): 8205-8221.
- [14] Halimov M, Fezer F. Eight yardang types in Central-Asia. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 1989, 33(2): 205-217.
- [15] Brookes I A. Aeolian erosional lineations in the Libyan desert, Dakhla region, Egypt. *Geomorphology*, 2001, 39(3/4): 189-209.
- [16] Inbar M, Risso C. Holocene yardangs in volcanic terrains in the southern Andes, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(6): 657-666.
- [17] Gutiérrez-Elorza M, Desir G, Gutiérrez-Santolalla F. Yardangs in the semiarid central sector of the Ebro depression (NE Spain). *Geomorphology*, 2002, 44(1-2): 155-170.
- [18] 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). *Geomorphology*, 2009, 104(3/4): 93-104.
- [19] Dong Z B, Lv P, Lu J, et al. Geomorphology and origin of yardangs in the Kumtagh desert, northwest China. *Geomorphology*, 2012, 139-140: 145-154.
- [20] Grolier M J, McCauley J F, Breed C S, et al. Yardangs of the Western Desert. *The Geographical Journal*, 1980, 146(1): 86-87.
- [21] Hu C Q, Chen N H, Kapp P A, et al. Yardang geometries in the Qaidam Basin and their controlling factors. *Geomorphology*, 2017, 299: 142-151.
- [22] Zhao Y H, Chen N H, Chen J Y, et al. Automatic extraction of yardangs using Landsat 8 and UAV images: A case study in the Qaidam Basin, China. *Aeolian Research*, 2018, 33: 53-61.
- [23] Ward A W, Greeley R. Evolution of the yardangs at Rogers Lake, California. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(7): 829-837.
- [24] Pelletier J D. Controls on yardang development and morphology: 2. Numerical modeling. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 2018, 123(4): 723-743.
- [25] Xia Xuncheng. Scientific Exploration and Research in Lop Nur. Beijing: Science Press, 1987. [夏训诚. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [26] Xia X C, Mu G J, Lei J Q. Some new progress in scientific research on the Lop Nur Lake region, Xinjiang, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45: 148-156.
- [27] Xia Xuncheng. Lop Nur in China. Beijing: Science Press, 2007. [夏训诚. 中国罗布泊. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [28] Lin Yongchong, Mu Guijin, Qin Xiaoguang, et al. Erosion characteristics of yardangs at Loulan area, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(1): 33-39. [林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等. 新疆楼兰地区雅丹地貌差异性侵蚀特征. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 33-39.]
- [29] Zheng Benxing, Zhang Linyuan, Hu Xiaohong. Distribution and characteristics of yardang landform and its formation period, west to Yumenguan, Gansu. *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. *中国沙漠*, 2002, 22(1): 40-46.]
- [30] Lin Yongchong, Mu Guijin, Qin Xiaoguang, et al. Weathering impact on the development of yardang landforms in Loulan region. *Arid Land Geography*, 2018, 41(6): 1278-1284. [林永崇, 穆桂金, 秦小光, 等. 地表风化作用对楼兰地区雅丹地貌发育的影响. *干旱区地理*, 2018, 41(6): 1278-1284.]
- [31] Zhang Xiaohong, Zhao Shengliang, Chen Fengtian. The application of agisoft photoscan in UAV aerial photographic image data processing. *Value Engineering*, 2013, 32(20): 230-231. [张小宏, 赵生良, 陈丰田. Agisoft photoscan 在无人机航空摄影影像数据处理中的应用. *价值工程*, 2013, 32(20): 230-231.]
- [32] Xiao X, Wang J, Huang J, et al. A new approach to study terrestrial yardang geomorphology based on high-resolution data acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs): A showcase of whaleback yardangs in Qaidam Basin, NW China. *Earth and Planetary Physics*, 2018, 2(5): 398-405.
- [33] Hu Chengqing. Yardang geometries and control factors in the Qaidam Basin based on multi-source remote sensing images [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. [胡程青. 基于多源遥感影像的柴达木盆地雅丹几何学和控制因素 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.]
- [34] Mainguet M. Un étonnant paysage: Les cannelures gréseuses du Bembéché (N. du Tchad). *Annales de Géographie*, 1970, 79(431): 58-66.

- [35] McCauley J F, Grolier M J, Breed M J, et al. Yardangs of Peru and other desert regions. Reston: US Geological Survey, 1977.
- [36] Song Haoze, Mu Guijin, Lin Yongchong, et al. Influence of common pedestal of yardangs on the morphological measurement. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 48-55. [宋昊泽, 穆桂金, 林永崇, 等. 雅丹共基座现象对雅丹形态测量的影响. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 48-55.]
- [37] Yang Geng. On distribution of the yardang in Xinjiang. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, 29(Suppl.2): 286-290. [杨更. 新疆雅丹地貌分布特征浅析. *四川地质学报*, 2009, 29(Suppl.2): 286-290.]
- [38] Whitney M I. Eolian features shaped by aerodynamic and vorticity processes//Brookfield M E, Ahlbrandt T S. *Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier, 1983: 223-245.
- [39] Whitney M I. Yardangs. *Journal of Geological Education*, 1985, 33(2): 93-96.
- [40] Laity J E. Landforms of aeolian erosion//Abrahams A D, Parsons A J. *Geomorphology of Desert Environments*. Dordrecht: Springer, 1994: 506-535.
- [41] Xia Xuncheng. A summary of the scientific investigation of Lop Nur in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 1985, 2(1): 1-5. [夏训诚. 新疆罗布泊科学考察综述. *干旱区研究*, 1985, 2(1): 1-5.]
- [42] Li K K, Qin X G, Yang X Y, et al. Human activity during the late Pleistocene in the Lop Nur region, northwest China: Evidence from a buried stone artifact. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(11): 1659-1668.
- [43] Niu Qinghe, Qu Jianjun, Liu Benli, et al. Dating methods for chronological study of yardang landforms: A review and perspective in application. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(4): 201-208. [牛清河, 屈建军, 柳本立, 等. 雅丹地貌形成年代研究方法简评与应用. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(4): 201-208.]
- [44] Hedin S. *Lop Nur: Scientific results of a journey in central Asia (1889-1902)*. Stoochholm: Stoochholm Scientific Report, 1905.
- [45] Hörner N G. Lop-Nur: Topographical and geological summary. *Geografiska Annaler*, 1932, 14(3-4): 297-321.
- [46] Wang Fubao, Ma Chunmei, Xia Xuncheng, et al. Environmental evolution in Lop Nur since late Pleistocene and its response to the global changes. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1): 150-153. [王富葆, 马春梅, 夏训诚, 等. 罗布泊地区自然环境演变及其对全球变化的响应. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 150-153.]
- [47] Wang Mili. *Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xinjiang*. Beijing: Geological Publishing House, 2001. [王弭力. 罗布泊盐湖钾盐资源. 北京: 地质出版社, 2001.]
- [48] Jia Hongjuan, Qin Xiaoguang, Liu Jiaqi. Environmental change of the past 10. 84 ka in Loulan, Xinjiang. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 175-184. [贾红娟, 秦小光, 刘嘉麒. 楼兰佛塔剖面 10. 84 ka B.P. 以来的环境变迁. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 175-184.]
- [49] Tang Shangshu. Study on the environmental evolution of the Lop Nur area from Han to Tang Dynasty [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. [唐尚书. 汉唐间罗布泊地区的环境演变研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.]
- [50] Li K K, Qin X G, Zhang L, et al. Oasis landscape of the ancient Loulan on the west bank of Lake Lop Nur, northwest China, inferred from vegetation utilization for architecture. *The Holocene*, 2019, 29(6): 1030-1044.
- [51] Lin Yongchong, Mu Guijin, Li Wen, et al. Environmental change of the ancient oasis in Loulan, Xinjiang during the Little Ice Age. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(7): 125-132. [林永崇, 穆桂金, 李文, 等. 小冰期新疆楼兰地区绿洲生态环境变迁事件. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(7): 125-132.]
- [52] Li Kangkang, Qin Xiaoguang, Zhang Lei. The ancient oasis and human activity in Lop Nur (Loulan) region during 1260-1450 A.D. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(3): 720-731. [李康康, 秦小光, 张磊, 等. 罗布泊(楼兰)地区 1260—1450 A.D. 期间的绿洲环境和人类活动. *第四纪研究*, 2018, 38(3): 720-731.]

Geomorphology and origin of yardangs in Lop Nur Lake region

SONG Haoze¹, YANG Xiaoping¹, MU Guijin^{2,3}, QIN Xiaoguang⁴, LIN Yongchong⁵

(1. School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 3. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Cele 848300, Xinjiang, China; 4. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China; 5. School of History and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

Abstract: Yardang is a typical, aeolian erosion landform widely distributed on Earth and discovered on other planets (Venus and Mars) too. Because of its various forms and volatility, yardang's morphological characteristics have attracted attention for generations. Lop Nur is located in the eastern part of the Tarim Basin in Xinjiang, China. Although there are many yardangs with various types in the area of Lop Nur, there is a lack of study about this impressive landform there. On the basis of field investigation, the authors found that UAV drones can efficiently and effectively collect yardang morphology data. Based on collected yardang morphology data (including field survey and DEM from UAV), using the terrain digital extraction method, after measuring the morphological parameter data of yardang, this article attempts to clarify the morphological characteristics of yardangs in the Lop Nur area, and to discuss its formation processes. The main conclusions are as follows: (1) The lengths of yardangs in the Lop Nur area are often < 20 m, although a few of them are even > 160 m. The widths of yardangs in our study area are mainly < 8 m, with a height of mostly < 2 m. It shows that the sizes of yardangs in the study area are generally small, although some large ones occur too. The ratio of length vs. width (R) of yardangs ranges from 2:1 to 4:1, and even $> 10:1$. The orientations of the yardangs in our study area are mainly toward 22.5° - 67.5° , consistent with the predominant wind directions. Our observations suggest that the morphology of yardangs in the study area initiated from a dome-shaped form and then changed to drop-shaped, and finally to linear forms. The number of yardangs occurring nearby is often 3-4, and the distance between them is often < 20 m but occasionally 40-80 m. (2) The most likely evolution processes of yardangs in the Lop Nur area can be summarized into four stages: embryonic, juvenile, mature and decay periods. However, due to the influence of various controlling factors such as stratum sediment characteristics, wind erosion, and flowing water, yardang's morphology in the Lop Nur area become quite complex. (3) The developments of yardangs in the Lop Nur area have multiple periods. Since the Quaternary, there have been four main development periods in late Pleistocene (ca. 90 ka B.P.), early Holocene (8-9 ka B.P.), late Holocene (after 1.6 ka B.P.) and Little Ice Age (around 0.5 ka B.P.). According to morphological characteristics and environmental evolution, we infer that yardangs in Longcheng and Bailongdui were formed in the late Pleistocene, the northern Loulan grand yardangs formed in the Early Holocene, yardangs in central and northern Loulan formed in the late Pleistocene and the small yardangs in Loulan area formed probably during the Little Ice Age. Based on the chronology and yardangs' height, the average wind erosion rate near the Loulan site after 0.5 ka B.P. was calculated to be 6.2 mm a^{-1} . Accurately describing the morphological characteristics of yardangs in the Lop Nur area and understanding its evolution procession is of great significance for analyzing the morphological development of yardangs and the regional wind erosion process.

Keywords: geomorphology; wind-eroded landform; Yardang; Lop Nur