



# 羽毛状沙丘辨析

董治宝

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, 兰州 730000

**摘要** 近年来,随着库姆塔格沙漠研究的深入,中国学者对羽毛状沙丘的争论愈来愈多。本文综合分析了国内外沙丘分类学中关于羽毛状沙丘的论述,确认羽毛状沙丘是复合线形沙垄的变型,其中沙垄主脊构成“羽柄”,而叠加其上的次级沙丘脊歧出主沙丘脊,构成“羽毛”。对比分析世界其他沙漠与中国库姆塔格沙漠所谓羽毛状沙丘的形态学特征发现,库姆塔格沙漠所谓的羽毛状沙丘实际上是典型的赛夫沙丘,不应视为羽毛状沙丘。以往根据遥感影像确定的羽毛状沙丘的“羽毛”部分是由地表沉积物反照率对比形成的羽毛状图案,与垄间地的沙埂没有很好的对应关系。羽毛状沙丘是在比较复杂的风况和沙源供应不够充分的条件下形成的。因此本文认为以往关于库姆塔格沙漠羽毛状沙丘的不确切认识概念应予以纠正。

**关键词** 风沙地貌;沙丘分类;羽毛状沙丘

**中图分类号** P931.3

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2009)20-0069-07

## The Identification of Feathery Dunes

DONG Zhibao

*Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

**Abstract** Chinese scholars are paying unprecedented attentions on feathery dunes in recent years in their studies on the Kumtagh Desert, but with widely divergent views on feathery dunes. This paper reviews dune classifications proposed by several authors. It is shown that a feathery dune is a variation of a compound linear ridge, in which the main ridge acts as a "shaft" and subsidiary dunes diverging from the main ridge act as "feathers". Comparing the morphology of the feather dunes reported in other deserts around the world and that in the Kumtagh Desert of China, one may see that the so-called feather dunes in the Kumtagh Desert are in fact not real feather dunes, but typical seif dunes. The "feathers" erroneously assumed on remote sensing images are patterns reflecting albedo contrast of the ground surface sediments. They are not related to the relief on the inter-seif dune corridors. Feather dunes are developed in the complex wind regime under the condition of insufficient sand supply. That misconception of feather dunes held by some Chinese scholars should be corrected.

**Keywords** aeolian geomorphology; dune classification; feather dunes

## 0 引言

“羽毛状”沙丘 (feather dunes, feathered dunes, feathery dunes, feather-like longitudinal ridges, plumate dunes),顾名思义,因沙丘外观像羽毛而得名,是一个沙丘分类学名词,以往国内外的研究中报道很少。这有两个方面的可能原因:一是因为这种沙丘类型不太普遍而不足以引起研究者的重视;二是因为这一名词仅以外观特征形象地命名沙丘,从而不被学术界认可。然而近年来,随着对库姆塔格沙漠研究的深入,中国学者对羽毛状沙丘显示出空前的兴趣。文献检索表明,专门讨论羽毛状沙丘的文章几乎都出自中国学者<sup>[1-8]</sup>。但即使中国学者对羽毛状沙丘的理解分歧也很多<sup>[5-7]</sup>,主要集中在羽毛状沙丘的定义,其次是其成因。例如,关于库姆塔格沙漠,目前尚在争论:究竟什么是羽毛状沙丘,库姆塔格沙漠到底有无羽毛状沙丘,以往中国学者普遍承认的羽毛状沙丘是否符合学术界定义的羽毛状沙丘。针对这些问题,本文试图根据国内外目前的研究成果,给出关于羽毛状沙丘更清晰的认识。

## 1 羽毛状沙丘与沙丘分类学

羽毛状沙丘既然作为一种沙丘类型被提出,那么对其准确理解自然应溯源于沙丘分类学。但令人遗憾的是,目前沙丘分类学本身还是一个很不完善的研究领域,因此对羽毛状沙丘认识存在分歧也就不难理解了。沙丘是风况、沙源供应及地表特征等多因素综合作用的结果,而这些因素的变化极其复杂,从而导致多种多样的沙丘。为了掌握沙丘形成与演变规律,首先要进行沙丘分类,进而将沙丘类型与其形成条件联系起来。自风沙地貌学研究诞生以来,沙丘分类一直是

收稿日期: 2009-08-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40638038)

作者简介: 董治宝 (中国科协所属全国学会个人会员登记号: S110004528M), 研究员, 研究方向为风沙物理与沙漠化防治, 电子信箱: zbdong@lzb.ac.cn

风沙地貌学家不断探索的课题,中外学者基于不同的原则提出了不同的沙丘分类系统。目前已经采用的分类原则有动力学、形态学、形态动力学和沙丘活动性等。代表性的沙丘分类系统有:费道洛维奇(Fedolovich)分类系统、USGS 分类系统、Mauget 分类系统、Cooke 分类系统、Livingstone-Warren 分类系统、Tsoar 分类系统和 Edgell 分类系统。应当承认,沙丘分类是一项综合研究工作,有赖于风沙地貌学的研究成果,并随风沙地貌研究工作的深入不断完善。

以费道洛维奇为代表的苏联学者,基于对亚洲中部卡拉库姆沙漠的观察,根据风力条件和沙丘形态特征,提出了三级沙丘分类系统<sup>[9]</sup>。他首先将沙丘按自然地带分为:主要是热带荒漠的新月形沙丘、主要是温带荒漠的半固定沙丘和主要是非荒漠地带的沙漠。根据风动力条件,将各自然地带的沙丘划分为4种基本动力类型:① 对流型,形成于风力较为均匀的地区;② 信风型,形成于单向或数个风向相近似的定向风地区;③ 季风-软风型,形成于季风更替和相反风向制动的地区;④ 干扰型,形成于气流受山体等障碍物的影响受到明显干扰的地区。在每一种基本动力类型中,又根据形态特征划分出基本沙丘类型、复合和复杂沙丘类型。尽管费道洛维奇的沙丘分类系统中提到了很多沙丘类型,但主要是基于卡拉库姆沙漠,所以其涵盖范围仍然非常有限,没有提及羽毛状沙丘。

美国地质调查局(USGS)于1979年出版了McKee的《A Study of Global Sand Seas》,基于当时的地球资源卫星影像,对全球沙丘进行了比较全面的分类<sup>[10]</sup>。McKee的沙丘分类系统基于沙丘形态动力学原则。他认为,全球沙丘类型数量众多,任何一个分类系统都难以客观和全面地涵盖。他首先将沙丘分为11种基本或简单沙丘类型:沙片、沙带、穹状沙丘、新月形沙丘、新月形沙垄、横向沙垄、风蚀坑、抛物线沙丘、线形沙丘、反向沙丘和星状沙丘。在此基础上,又进一步提出复合沙丘、复杂沙丘及沙丘变型。复合沙丘是由同一类型简单沙丘重叠和叠加而成的,而复杂沙丘则是由不同类型的简单沙丘融合共同发育而成的。所谓沙丘变型,既不属于简单沙丘,也不属于复合沙丘或复杂沙丘。例如,一翼延伸很长的新月形沙丘,一端有许多分支的线性沙丘,即羽毛状沙丘(图1)。查阅文献发现,这是最早提到羽毛状沙丘,并给予了初步定义的文献。McKee最初将羽毛状沙丘描述为“…… linear dunes with many branches diverging from one end suggesting the name feather dunes ……”<sup>[11]</sup>。由此可知,McKee最早提出的羽毛状沙丘是介于简单线形沙丘和复合线形沙丘之间,所谓线形沙丘变型,其对羽毛状沙丘的辨识主要基于当时的卫星影像。根据McKee的定义,羽毛状沙丘由两部分组成,所谓的“羽柄”是主线形沙丘,所谓的“羽毛”是分支线形沙丘,羽毛一般在羽柄的两端。

同样在《A Study of Global Sand Seas》一书中,Breed和Grow在McKee沙丘分类系统的基础上,根据地球资源卫星影像分析,提出了另一个全球沙丘的简明分类系统<sup>[12]</sup>。他们首

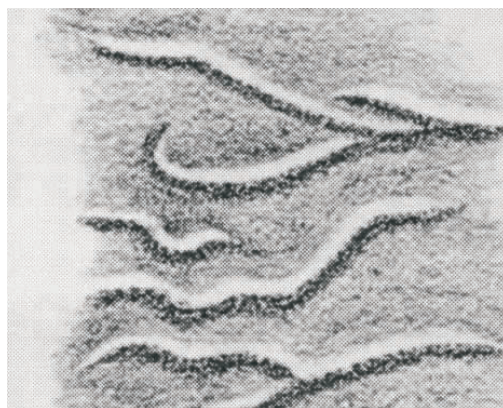


图1 McKee定义的羽毛状沙丘

Fig. 1 Feather dunes as defined by McKee

先按照从卫星影像和航空影像上量测的沙丘形态参数,如沙丘宽度、长度或半径,以及落沙坡的位置及其对称轴等将沙丘分为线形、新月形、金字塔形、穹状和抛物线形5大类,每大类沙丘中又分为简单、复合和综合3种,对应于McKee分类系统中的简单沙丘、复合沙丘和复杂沙丘。在复合线性沙垄中,他们将次级沙丘脊与主沙丘脊相交或从主沙丘脊斜向展布出去的沙丘称为羽毛状沙丘,对其描述为“*In the feathered variety of compound linear dunes, subsidiary ridges intersect or spread obliquely from the main ridge*”。与McKee不同的是,Breed和Grow将羽毛状沙丘定义为复合线形沙垄的一种变型。实际上,复合线形沙垄和McKee提出的线形沙丘变型是很难区别的,所以,Breed和Grow与McKee对羽毛状沙丘的定义基本是一致的,仅稍有不同。根据Breed和Grow的定义,所谓的羽毛是与主线形沙垄沙脊斜交的次级沙丘,不一定在主线形沙垄的末端,可以出现在任何部位。

Mainguet提出了沙丘的3级分类系统<sup>[13]</sup>。首先,按照活动性将沙丘分为流动沙丘、固定沙丘和植被覆盖沙丘;然后,将流动沙丘分为:新月形沙丘和横向沙丘、线形沙丘、复杂沙丘和星状沙丘。在上述4种流动沙丘中,又根据形态特征划分出若干亚种。线形沙丘包括复合线形沙垄,其中依外观形态特征提出花束状沙丘(bouquet dunes),相当于McKee、Breed和Grow所指的羽毛状沙丘。显然,Mainguet将次级沙丘脊呈花束状组合排列的复合线形沙垄称为羽毛状沙丘,这与McKee、Breed和Grow的定义也较为类似。

Cooke等根据沙丘活动性将沙丘分为固定型、受阻型和流动型<sup>[14]</sup>,再进一步分为若干基本沙丘类型。1996年,Lingstone和Warren将该分类系统简化为自由型和受阻型,然后再进一步分为若干基本沙丘类型<sup>[15]</sup>。Tsoar根据沙丘运动特征,将流动沙丘分为迁移型,如横向沙丘和新月形沙丘;延伸型,如线形沙丘;堆积型,如星状沙丘。进一步又分为地形控制堆积型、自堆积型和植物控制堆积型<sup>[16]</sup>。最后,按照形态特征又分出若干基本沙丘类型。上述分类系统均未提及羽毛状沙丘。

另一个提到羽毛状沙丘的是Edgell分类系统<sup>[17]</sup>。Edgell

在研究阿拉伯半岛的沙漠时,根据形态与发生学原则,将沙丘分为6大类:横向沙丘、新月形沙丘、S形沙丘、线形沙丘、复杂新月形沙丘和复杂沙丘。在线形沙丘中,提出了羽毛状分支沙丘,将羽毛状沙丘描述为,沙丘沿顺风方向逐渐合并变窄成单个沙丘的复合线形沙丘。与 McKee、Breed 和 Grow 的羽毛状沙丘定义的区别是:所谓的“羽毛”在上风向,可以是线形沙丘,也可以是新月形或横向沙丘,向下风向逐渐聚拢为“羽柄”。

以上沙丘分类系统表明,羽毛状沙丘在一些分类系统中并未出现,是随着遥感影像的出现才逐渐被认识的一种沙丘类型。然而,即使包含羽毛状沙丘的分类系统,关于羽毛状沙丘的定义和描述也不径相同,但有一个共识,即羽毛状沙丘属于复合线形沙丘。目前,最明确的羽毛状沙丘的定义还是由《A Study of Global Sand Seas》一书给出的,即羽毛状沙丘是复合线形沙丘的变型,其中次级沙丘脊歧出主沙丘脊(A variety of compound linear dune in which subsidiary ridges diverge from the main ridge)<sup>[10]</sup>。

## 2 羽毛状沙丘的形态学特征

目前,关于羽毛状沙丘的报道较少,《A Study of Global Sand Seas》一书根据地球资源卫星影像的分析,已确定在下列地区有羽毛状沙丘分布:①西撒哈拉沙漠毛里塔尼亚的哈马米(Hammami)沙漠;②北撒哈拉沙漠的阿尔及利亚沙漠;③北撒哈拉沙漠利比亚的迈尔祖格(Marzuq)沙漠;④阿拉伯半岛鲁卜哈利(Rub al Khali)沙漠;⑤阿拉伯半岛西奈(Sinai)沙漠。为了更清晰地理解羽毛状沙丘,下文将根据 Google Earth 提供的分辨率较好的影像对不同沙漠的羽毛状沙丘形态学特征进行分析。

### 2.1 哈马米沙漠

哈马米沙漠位于毛里塔尼亚西部,分布在 22°N~24°N 和 10°W~12°30'W 之间。该沙漠沙丘类型主要以简单线形沙丘和复合线形沙丘为主,羽毛状沙丘(图2)分布于东北部,发育在冲积平原上。图2显示,该地的羽毛状沙丘属于复合线形沙丘,由羽柄和羽毛两部分组成。羽毛为发育在主沙丘两侧,并与主线形沙丘脊斜交的次级简单线形沙丘,向下风向逐渐辐合汇聚成羽柄。羽毛状沙丘主线形沙丘大致 NE-SW 走向,脊宽 80~1 800 m,脊高 5~10 m,脊间距 1~4 km,最宽可达 6 km。次级线形沙丘走向 NE20°~SW200°至 NE80°~SW260°,高 3~8 m,宽 5~20 m,间距 20~120 m。羽毛状沙丘属于典型线形沙丘发育风况,主要受 Azores 和 Sahara 高压及热带辐合带控制,年合成输沙风向为西南或西南偏南,年内风向变化较大,输沙风方向系数为 0.67。年输沙势大于 600 矢量单位,为高能环境。年降水量小于 80 mm,属于极端干旱区。由卫星影像显示的地表沉积物类型可知,哈马米沙漠的羽毛状沙丘是在沙源供应不足条件下形成的。

### 2.2 阿尔及利亚沙漠

阿尔及利亚沙漠的羽毛状沙丘主要分布在两个区域,一

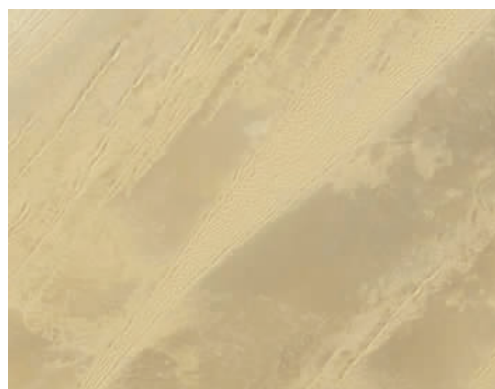


图2 西撒哈拉沙漠毛里塔尼亚的哈马米沙漠羽毛状沙丘  
(中心点坐标:23°03'51"N, 11°19'37"W)

Fig. 2 Feather dunes in the Hammami Desert of Mauritania, western Sahara Desert  
(center location: 23°03'51"N, 11°19'37"W)

是西部大沙漠(Grand Erg Occidental)南部,二是在布拉盖(Erg Bourarhet)沙漠。西部大沙漠位于撒哈拉沙漠北部,阿尔及利亚西北部,在 29°N~33°N 和 0°30'W~2°50'W 之间,是阿尔及利亚第二大沙漠,面积约 10.3 万 km<sup>2</sup>。沙漠北部主要为比较短的简单线形沙丘、复合新月形沙丘和沙山为主。羽毛状沙丘分布于沙漠的南部。从可获得的卫星影像(图3)看,羽毛状沙丘是复合线形沙丘,主沙脊近乎 NE-SW 走向,宽 1~2 km,脊间距 2~3.5 km,构成所谓的羽柄。主沙脊间地较窄,通常为硅钙壳壳。次级线形沙丘走向 NE50°~SW230°至 NE70°~SW250°之间,高 10~20 m,宽 15~50 m,间距 30~70 m。该羽毛状沙丘区属于中等强度风能环境,输沙风向比较复杂,主要由风向的季节变化所致,冬季盛行偏西风,夏季盛行东北风,年输沙风方向系数仅为 0.26,合成输沙风向与沙脊走向近乎垂直,这种现象主要是由冬季和夏季风向差异较大所致。

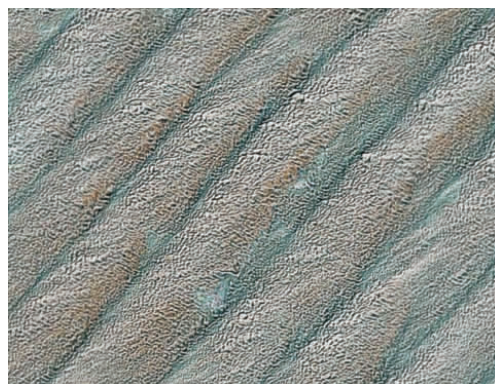


图3 北撒哈拉沙漠阿尔及利亚的西部大沙漠的羽毛状沙丘  
(中心点坐标:30°09'50"N, 0°57'34"E)

Fig. 3 Feather dunes in the Grand Erg Occidental of Algeria, northern Sahara Desert  
(center location: 30°09'50"N, 0°57'34"E)

布拉盖沙漠位于阿尔及利亚东部, 在  $26^{\circ}10'N \sim 28^{\circ}40'N$  和  $6^{\circ}10'E \sim 8^{\circ}50'E$  之间。该沙漠沙丘类型主要有复杂线形沙垄和复合新月形沙丘。羽毛状沙丘分布在沙漠北部。卫星影像(图 4)表明, 羽毛状沙丘为复合线形沙垄, 主脊走向大致为  $NE60^{\circ} \sim SW240^{\circ}$ , 宽  $500 \sim 1\,500\text{ m}$ , 间距  $1\,500 \sim 3\,500\text{ m}$ 。次级线形沙丘脊线不太直, 带有弯曲, 而且走向不一致, 在汇合处形成星状沙丘。次级线形沙丘走向以南北向者居多, 也有北偏东方向者, 高  $8 \sim 20\text{ m}$ , 间距  $100 \sim 600\text{ m}$ 。羽毛状沙丘区属于低能环境, 风向比较复杂, 方向系数为  $0.35$ 。沙垄间地多盐结壳, 羽毛状沙丘区上风向为盐碱地, 表明, 羽毛状沙丘是在沙源供应不充分的条件下形成的。



图 4 北撒哈拉沙漠阿尔及利亚的布拉盖沙漠的羽毛状沙丘 (中心点坐标:  $28^{\circ}08'11''N, 7^{\circ}32'25''E$ )  
Fig. 4 Feather dunes in the Erg Bourahet Desert of Algeria, northern Sahara Desert  
(center location:  $28^{\circ}08'11''N, 7^{\circ}32'25''E$ )

### 2.3 迈尔祖格沙漠

迈尔祖格沙漠位于利比亚西南部, 在  $23^{\circ}20'N \sim 26^{\circ}00'N$  和  $24^{\circ}10'E \sim 25^{\circ}50'E$  之间。该沙漠以复合新月形沙丘和线形沙丘(包括简单和复合)占绝对优势, 羽毛状沙丘仅在东北角有小面积分布。羽毛状沙丘为复合线形沙垄(图 5)。主沙垄走向大致  $NE80^{\circ} \sim SW260^{\circ}$ , 宽  $0.5 \sim 2\text{ km}$ , 间距  $2 \sim 6\text{ km}$ , 愈向上风向愈宽。次级线性沙丘构成羽毛, 长度较短, 间距  $50 \sim 500\text{ m}$ , 走向自主沙垄向南偏离。次级线形沙丘向下风向汇聚形成羽柄。羽毛状沙丘区附近的气象资料表明, 该区风况比较复杂。羽毛状沙丘区上风向为盐碱地和盐湖, 垄间地为粗沙覆盖, 所以沙源供应不够充分。

### 2.4 鲁卜哈利沙漠

鲁卜哈利沙漠位于阿拉伯半岛南部, 为世界最大的连续流动沙漠, 面积约  $52.2\text{ 万 km}^2$ 。在  $23^{\circ}20'N \sim 26^{\circ}00'N$  和  $24^{\circ}10'E \sim 25^{\circ}50'E$  之间。整个沙漠的沙丘类型以线形沙丘为主, 中东部以新月形沙丘为主, 东部和南部边缘地带以星状沙丘为主。根据卫星影像, 羽毛状沙丘在西北部、中部和东北部均有分布。

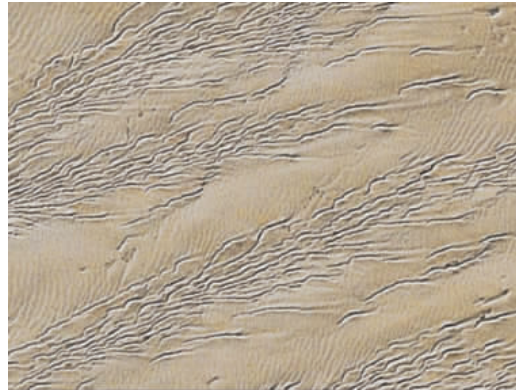


图 5 北撒哈拉沙漠利比亚迈尔祖格沙漠的羽毛状沙丘 (中心点坐标:  $25^{\circ}39'26''N, 14^{\circ}17'53''E$ )  
Fig. 5 Feather dunes in the Marzuq Desert of Libya, northern Sahara Desert  
(center location:  $25^{\circ}39'26''N, 14^{\circ}17'53''E$ )

在鲁卜哈利沙漠西北部, 羽毛状沙丘集中分布在耶卜林绿洲南  $140 \sim 250\text{ km}$  的阿什舒干地区, 在  $17^{\circ}00'N \sim 22^{\circ}30'N$  和  $44^{\circ}30'E \sim 50^{\circ}20'E$  之间, 呈  $NE-SW$  向展布的条带。羽毛状沙丘主要是复合线形沙垄, 有少数为复杂线形沙垄(图 6)。主线形沙垄走向大致  $NE60^{\circ} \sim SW240^{\circ}$ , 宽  $50 \sim 800\text{ m}$ , 东北宽, 西南窄, 由次级线形沙丘向下风向聚合形成羽柄, 间距变化较大, 为  $1 \sim 7\text{ km}$ , 垄间有宽阔的走廊。次级线性沙丘构成羽毛部分, 大都在主线形沙垄的东南侧向偏南方向辐射出去, 因而其走向变化范围较大, 一般在  $NE80^{\circ} \sim SW260^{\circ}$  至东西向之间, 高  $3 \sim 10\text{ m}$ , 由新月形沙丘演变而来, 所以, 有些羽毛状沙丘的次级沙丘既有简单线形沙丘, 也有新月形沙丘和沙丘链。所以, Edgell 认为, 该区羽毛状沙丘的形成过程是由众多的与主线形沙垄走向不一致的沙丘或新月形沙丘向下风向合并, 最终形成单个沙垄<sup>[7]</sup>。但如果认为次级线形沙丘是由新月形沙丘演变而来, 则可以认为该地的羽毛状沙丘为复合线形沙垄,



图 6 鲁卜哈利沙漠西北阿什舒干地区的羽毛状沙丘 (中心点坐标:  $21^{\circ}45'45''N, 48^{\circ}45'11''E$ )  
Fig. 6 Feather dunes in Ash Shuqqan area, northwestern Rub al Khali Desert  
(center location:  $21^{\circ}45'45''N, 48^{\circ}45'11''E$ )

只不过是有些次级线形沙丘尚未发育完全。羽毛状沙丘北部(处于上风向)为盐碱地,再结合比较宽阔的垄间粗沙走廊,可以推断,本区羽毛状沙丘也是在沙源供应不充分的条件下形成的。羽毛状沙丘的南部和西北部为复合线形沙垄和简单线形沙丘。

鲁卜哈利沙漠中部的羽毛状沙丘分布在  $20^{\circ}00'N \sim 22^{\circ}00'N$  和  $52^{\circ}00'E \sim 54^{\circ}00'E$  之间。羽毛状沙丘为复合线形沙垄(图7),主沙垄走向为  $NE20^{\circ} \sim SW200^{\circ}$ ,宽度  $10 \sim 80$  m,上风向展开较宽,而下风向收缩较窄,垄间走廊宽阔,多为粗沙覆盖,甚至为盐结壳,  $1 \sim 3.5$  km 间,表明沙源供应不够充分。次级线形沙丘基本上都在主沙垄东南侧,自主沙垄向偏南方向歧出,走向  $NE70^{\circ} \sim SW250^{\circ}$  至  $NE85^{\circ} \sim SW265^{\circ}$  间,高  $2 \sim 5$  m,间距仅数米至数十米。

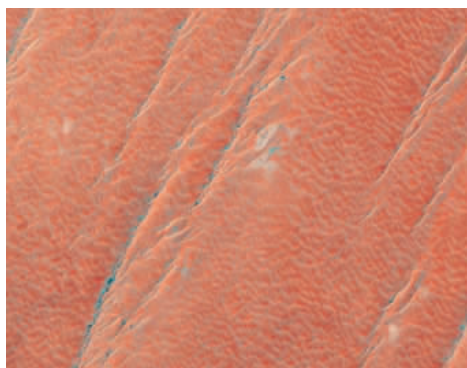


图7 鲁卜哈利沙漠中部的羽毛状沙丘  
(中心点坐标:  $20^{\circ}47'56''N, 52^{\circ}42'38''E$ )

Fig. 7 Feather dunes in mid-north of the Rub al Khali Desert  
(center location:  $20^{\circ}47'56''N, 52^{\circ}42'38''E$ )

鲁卜哈利沙漠东北部的羽毛状沙丘主要分布在阿联酋特鲁西尔海滨地带(图8)。主线形沙垄近乎东西走向,宽  $0.2 \sim 1$  km,垄间走廊宽阔,水分条件较好,有许多辟为农田,宽  $1 \sim 3.5$  km,表明沙源供应不够充分。所谓的羽毛主要分布在主沙垄的南侧,主沙垄北侧次级线形沙丘走向与主沙垄一致,而且规模较小。羽毛部分次级线形沙丘走向  $NE60^{\circ} \sim SW240^{\circ}$  至  $NE80^{\circ} \sim SW260^{\circ}$  间,高  $3 \sim 15$  m,间距仅数米至数十米。附近地区的气象资料表明,本区的输沙风向指向东偏南,较主沙垄走向偏南,所以羽毛部分是沿下风向向沙垄汇聚。

通过遥感影像的分析,在阿拉伯半岛南部也门北部的阿斯萨巴太沙漠、半岛北部的西奈沙漠也有小面积的羽毛状沙丘分布(图9、图10)。

根据目前已经报道的世界各地沙漠的羽毛状沙丘,可以得到以下认识:① 羽毛状沙丘属于复合线形沙垄,所谓羽柄是沙垄的主脊,而羽毛则是走向与主沙垄走向斜交的次级线形沙丘。有些次级线形沙丘是由新月形沙丘演变而来,所以在有些羽毛状沙丘上的次级沙丘呈现为新月形沙丘或沙丘

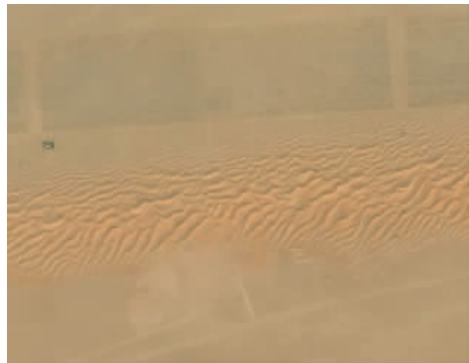


图8 鲁卜哈利沙漠东北部阿联酋鲁西尔海滨地区的羽毛状沙丘(中心点坐标:  $24^{\circ}24'24''N, 55^{\circ}18'37''E$ )  
Fig. 8 Feather dunes in the Trucial Coast of the United Emirates, northeastern Rub al Khali Desert  
(center location:  $24^{\circ}24'24''N, 55^{\circ}18'37''E$ )

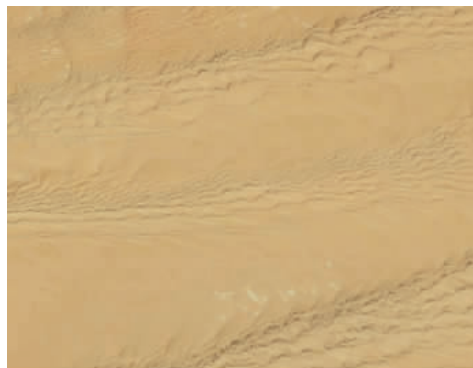


图9 阿拉伯半岛南部也门北部的阿斯萨巴太沙漠的羽毛状沙丘(中心点坐标:  $15^{\circ}27'01''N, 46^{\circ}13'56''E$ )  
Fig. 9 Feather dunes in the Ramlat As Sabatayn Desert of northern Yemen  
(center location:  $15^{\circ}27'01''N, 46^{\circ}13'56''E$ )



图10 阿拉伯半岛北部西奈沙漠的羽毛状沙丘(中心点坐标:  $30^{\circ}39'40''N, 32^{\circ}52'42''E$ )  
Fig. 10 Feather dunes in the Sinai Desert of northern Arabian Peninsula  
(center location:  $30^{\circ}39'40''N, 32^{\circ}52'42''E$ )

链。次级线形沙丘可能是向主沙垄汇聚,也可能是从主沙垄展布出去。被视为羽毛的次级线形沙丘可能在主沙垄的一端、两端、一侧或两侧发育。② 羽毛状沙丘区风况一般比较复杂。既有高能环境、也有中能和低能环境,合成输沙风向常与主沙垄走向不一致。③ 作为羽毛状沙丘的复合线形沙丘高度一般较小,垄间地开阔,反映沙源供应不够充分。

### 3 库姆塔格沙漠与羽毛状沙丘

中国关于羽毛状沙丘的报道仅在新疆东部、甘肃西部、罗布泊以南和阿尔金山以北的库姆塔格沙漠,将羽毛状沙丘视为一种特殊的复合型沙垄,沙垄之间为一些低矮的沙埂所分割,从而平面图形成特殊的羽毛状(图 11)<sup>[1]</sup>。夏训诚<sup>[2]</sup>对羽毛状沙丘的描述为:在库姆塔格沙漠北部,主要为羽毛状沙垄分布区,面积约 4 000 km<sup>2</sup>,占整个沙漠面积的 1/5。羽毛状沙垄是受东北风的影响下,作 NE-SW 向顺山坡向上延伸,沙垄之间为一些低矮的沙埂所分布,沙垄与沙埂交角接近直角,沙垄好似羽毛的管子,沙埂好似羽毛两侧的羽毛,从而形成独特的羽毛状沙垄。与前面关于世界其他沙漠的羽毛状沙丘形态特征相比,库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘具有如下特点:① 按中国学者的描述,库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘实际上不是复合线形沙垄,而是复杂线形沙丘,因为,所谓的羽毛,即沙埂与沙垄走向近乎垂直,那么就必然有一个是属于线形沙丘的范畴,而另外一个则属于横向沙丘的范畴。② 库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘没有区分沙垄和垄间地,将垄间地的起伏和沙垄一起视为一种复合沙丘。③ 库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘,特别是其中所谓沙埂的识别主要是基于航空相片的影像特征。所以,中国学者关于羽毛状沙丘的理解与世界其他地区的羽毛状沙丘是有差异的。为了便于学术交流,有必要理清对羽毛状沙丘的认识。

既然中国学者对羽毛状沙丘的认识是来自库姆塔格沙漠,那么,就从库姆塔格沙漠羽毛状沙丘的分析入手。首先需要澄清的两个关键问题是:① 将垄间地起伏和线形沙垄一起视为一种复合沙丘是否合理;② 遥感影像的色调主要反映的

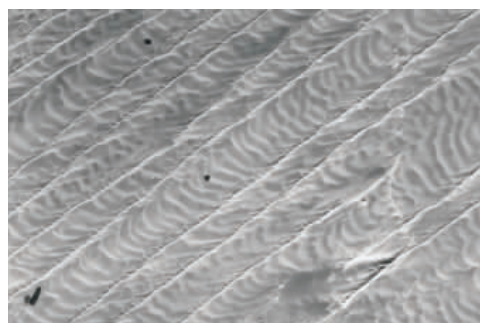


图 11 库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘  
(1971 年航片,中心点坐标:40°14'24.12"N, 92°26'24.53"E)  
Fig. 11 Feather dunes as assumed in the Kumtagh Desert of China (aerial photograph of 1971, center location: 40°14'24.12"N, 92°26'24.53"E)

是地表反照率差异,可以由地表起伏所致,也可以由地表沉积物本身反照率差异所致,在库姆塔格沙漠羽毛状沙丘区垄间地起伏并不大的情况下,垄间地的遥感影像特征与沙埂有何对应关系?

首先,我们认为,将垄间地起伏和线形沙垄一起视为一种复合沙丘欠妥。因为对于任何地区的沙丘而言,丘间地的平坦只是相对而言的,库姆塔格沙漠羽毛状沙丘区的沙埂仅为一般起伏,不具任何沙丘形态特征。屈建军等将沙埂称为舌状沙丘,高 0.5~2.3 m,大多数沙埂高度是很低的,所以仅是一般起伏<sup>[5]</sup>。舌状沙丘是来自遥感影像特征,实际沙埂并非舌状。其次,遥感影像显示的羽毛图案由地表沉积物本身的反照率对比所致。董治宝等将颜色较亮者称作浮沙片,意为与周围地表没有高差<sup>[6]</sup>。光谱测量结果表明,浮沙片的反照率为 0.31,而其周围暗色物质的反照率为 0.16,与火星上亮沙丘与暗沙丘之间的反照率对比十分接近<sup>[18]</sup>。实际上,类似库姆塔格沙漠这种由地表沉积物反照率差异形成遥感影像上的羽毛状图案在世界其他沙漠也是广泛分布的(图 12、图 13),但并不

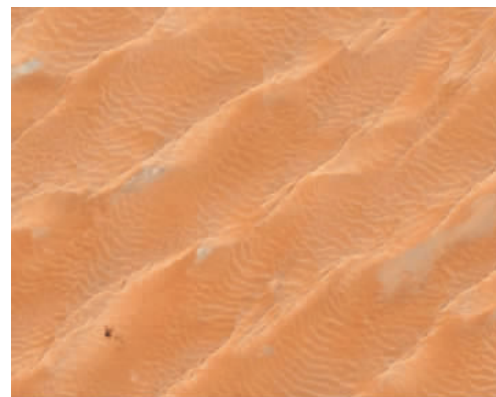


图 12 鲁卜哈利沙漠西部的羽毛状图案  
(中心点坐标:18°27'29"N, 47°05'02"E)

Fig. 12 Feather patterns in the western Rub al Khali Desert  
(center location: 18°27'29"N, 47°05'02"E)

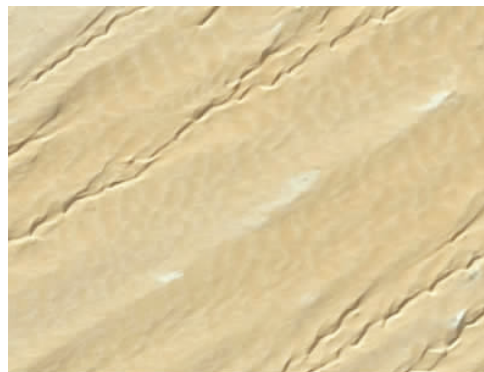


图 13 西撒哈拉沙漠毛里塔尼亚马克泰尔沙漠的羽毛状图案(中心点坐标:21°50'52"N, 11°33'43"E)  
Fig. 13 Feather patterns in the Markteir Desert, western Sahara Desert  
(center location: 21°50'52"N, 11°33'43"E)

未将其视为羽毛状沙丘。再者,遥感影像上的羽毛状图案与垄间沙埂没有很好的对应关系。尽管在高度较大的沙埂影响下,由于组成浮沙片的沉积物较细,因而较易风蚀,沉积于背风坡,而粒度较粗的暗色沉积物多沉积在迎风坡,但对于起伏较小的沙埂而言,亮色浮沙片可能沉积于沙埂的任何部位,从而导致羽毛状图案与沙埂没有很好的对应关系。

鉴于以上事实,本文认为库姆塔格沙漠所谓的羽毛状沙丘应为简单线形沙丘,更准确地说,是沙丘脊不够直的赛夫沙丘。以往认定的库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘仅是羽毛状图案。

#### 4 结论

羽毛状沙丘是随着遥感技术的发展,才逐渐被认识的沙丘类型。与新月形沙丘、线形沙丘以及星状沙丘等主要沙丘类型相比,羽毛状沙丘是一种不太常见、分布范围有限的沙丘,所以对其研究报道较少。分析世界各地沙漠已经报道的羽毛状沙丘的形态特征和形成条件可以发现,羽毛状沙丘是复合线形沙丘的一种变型,其中沙垄的主脊构成“羽柄”,而叠加其上的次级沙丘脊歧出主沙丘脊,构成“羽毛”。羽毛状沙丘是在沙源供应不够充分的条件下形成的。中国库姆塔格沙漠所谓的羽毛状沙丘不符合羽毛状沙丘的形态学特征。以往学者误将由地表沉积物反照率差异形成的羽毛状图案视为羽毛状沙丘,这种不确切的认识应予以纠正。

#### 参考文献 (References)

- [1] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.  
Wu Zheng. Aeolian geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [2] 夏训诚. 库姆塔格沙漠的基本特征[M]//夏训诚. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1987, 78-94.  
Xia Xuncheng. Some characteristics of the Kumtagh Desert [M]//Xia Xuncheng. Scientific Expedition in Lop Nor. Beijing: Science Press, 1987.
- [3] 刘虎俊, 王继和, 廖空太, 等. 库姆塔格沙漠“羽毛状沙丘”形态的示量特征[J]. 干旱区地理, 2006, 28: 314-320.  
Liu Hujun, Wang Jihe, Liao Kongtai, et al. Arid Land Geography, 2006, 28: 314-320.
- [4] 刘虎俊, 王继和, 廖空太, 等. 库姆塔格沙漠的“羽毛状沙丘”形态的观测[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 190-196.  
Liu Hujun, Wang Jihe, Liao Kongtai, et al. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 190-196.
- [5] 屈建军, 廖空太, 昝瑞平, 等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙垄形成机理研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 349-353.  
Qu Jianjun, Laio Kongtai, Zu Ruiping, et al. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 349-353.
- [6] 董治宝, 屈建军, 卢琦, 等. 关于库姆塔格沙漠“羽毛状”风沙地貌的讨论[J]. 中国沙漠, 2008, 28: 1005-1010, 1214.  
Dong Zhibao, Qu Jianjun, Lu Qi, et al. Journal of Desert Research, 2008, 28: 1005-1010, 1214.
- [7] Dong Z, Qu J, Wang X, et al. Pseudo-feathery dunes in the Kumtagh Desert[J]. Geomorphology, 2008, 100: 328-334.
- [8] 唐进年, 王继和, 苏志珠, 等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘表面沙粒度分布特征[J]. 干旱区地理, 2009, 31: 918-925.  
Tang Jinnian, Wang Jihe, Su Zhizhu, et al. Arid Land Geography, 2009,

31: 918-925.

- [9] 费道洛维奇 Б. А. 奥布鲁契夫开始考察以来沙漠学的成就 [M]// 陈治平, 等译. 沙漠地貌的起源及研究方法. 北京: 科学出版社, 1962: 1-15.  
Fedolovich B. A. Research achievements in desert research since Oboruchiev's desert exploration [M]//Chen Zhiping, et al tran. Origin of Desert Landforms and Research Methods. Beijing: Science Press, 1962: 1-15.
- [10] McKee E D. A study of global sand seas [M]. Honolulu, Hawaii: University Press of Pacific, 2004.
- [11] McKee E D. Introduction to a global study of sand seas[M]//McKee E D. A Study of Global Sand Seas. Honolulu, Hawaii: University Press of Pacific, 2004: 1-19.
- [12] Breed C S, Grow T. Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing [M]//McKee E D. A Study of Global Sand Seas. Honolulu, Hawaii: University Press of Pacific, 2004: 253-302.
- [13] Mainguet M. A classification of dunes based on aeolian dynamics and the sand budget [M]//El-Baz F. Deserts and Arid Lands. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1984: 31-57.
- [14] Cooke R, Warren A, Goudie A. Desert Geomorphology[M]. London: UCL Press, 1993.
- [15] Livingstone I, Warren A. Aeolian Geomorphology[M]. England: Addison Wesley Longman Limited, 1996.
- [16] Tsoar H. Types of aeolian sand dunes and their formation[R]//Balmforth N J, Provencale A. Geomorphologic Fluid Mechanics, Lecture notes in Physics. 2001, 582: 403-429.
- [17] Edgell H S. Arabian deserts[M]. The Netherlands: Springer, 2006.
- [18] Edgett K S, Parker T J. Bright aeolian dunes on Mars: Viking observer observations[J]. Lunar and Planetary Science, 1998, XXIX: 1338.

(责任编辑 朱宇)

#### ·学术不端行为举报·



举报信箱

hjjy@cast.org.cn

本刊 2009 年第 17 期第 121 页刊载了加拿大蒙特利尔大学综合工学院教授、中国地质科学院地质研究所客座研究员嵇少丞的文章“是什么让人尊重大学教授”。该文最早发布在嵇少丞教授个人博客上(原文题目为“凭什么让人尊重大学教授?”约 3500 字)。本刊编辑通过约稿,经作者同意刊登后,将原文删减成 2100 字,又经作者审阅、修订、确认后刊出。

嵇少丞教授在已经应允该文章在《科技导报》刊登的情况下,随又应允在《科学新闻》杂志刊登。他的行为已构成一稿两投。专此公布。

——《科技导报》编辑部