

# 塔克拉玛干沙漠 风沙地貌图说明书

257271

中国科学院兰州沙漠研究所

# 塔克拉玛干沙漠风沙地貌图说明书

(塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成发育和形态特征)

执笔者：朱震达。

制图者：王一谋、冯毓荪、彭期龙、李伟民。

野外考察研究者：朱震达、陈治平、陈永宗、吴正、

李巨章、李炳元、吴功成。

257271

# 目 录

一 . 前 言

二 . 与风沙地貌形成发育和分布有关的诸因素

三 . 风沙地貌形态特征的定性分析

四 . 风沙地貌形态特征的定量分析

五 . 风沙地貌发育过程中形态变化的特征及沙丘的移动

## 一．前言

塔克拉玛干沙漠位于新疆南部塔里木盆地的中央,是我国最大的沙漠,面积为33.7万平方公里,约占全国沙质荒漠面积的1/2左右,也是世界上著名的大沙漠之一。从其自然特征来说,在我国沙漠中也有其独特性,首先是气候极端干旱,年降雨量在60毫米以下,沙漠东部少至10毫米以下,干燥度在24至60。其次是流动沙丘大面积分布,占整个沙漠面积的85%。第三是沙丘形态复杂,有1/2左右的面积都是高大的沙丘复合体。正是如此阐明塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成发育和形态特征是有着科学上的意义。

由于塔克拉玛干沙漠自然环境极为艰巨,考察工作困难。因此,过去对它的研究很少,在科学领域中还是一个“空白”。虽然在十九世纪八十年代至廿世纪三十年代,曾经有过一些人进行过考察,如斯文赫定(Sven Hedin),M·斯坦因(M·Stein),E·那琳(Norin),黄文弼等。但大部分是从个别路线考察资料来加以叙述,至于全面的反映塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成发育和形态特征的研究,还没有进行。中华人民共和国成立以后,自1959年至1963年中国科学院治沙队曾多次进行了沙漠的考察(包括地面及航空考察),1973年至1979年中国科学院兰州沙漠研究所又曾多次对塔克拉玛干沙漠南部和东部进行了研究。并在上述考察和航空相片分析的基础上,编制了塔克拉玛干沙漠地图,拟写了说明书,扼要的论述了塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成发育,形态特征和风沙运动规律。其中不当之处还希大家批评指正。

## 二．与风沙地貌形成发育和分布有关的诸因素

沙漠的形成乃是干旱气候的产物。塔克拉玛干沙漠位于亚洲中部的内陆盆地—塔里木盆地中央,受湿润气流的影响较少,特别是青藏高原及其周围山地的强烈隆起,成为季风的严重障碍,使高原北部的塔里木盆地成为冬寒干燥,夏热少雨的暖温带极端干旱区,为沙漠的形成提供了气候条件。然而也要指出,沙漠的形成除气候条件外,还需丰富的沙物质来源,这是沙漠形成的物质基础。

沙漠沙物质来源是和第四纪时期古地理及风成沙的下伏地貌有着密切的关系,因此有必要先说明一下沙漠风成沙的下伏地貌特征。根据航空相片判读分析,地质资料和地面考察研究的结果表明:塔克拉玛干沙漠的原始地面除了麻扎塔格和北民丰隆起为石质低山外都为深厚而疏松的沙质沉积物所组成的平原。以沙漠西部为例,其厚度可达300米左右。但从成因上分析还有区域的差异,沙漠南部是源出昆仑山的一些河流下游三角洲及洪积冲积扇所组成,其中科什塔格河和喀拉喀什河的干三角洲占据麻扎塔格以南塔克拉玛干沙漠西南的大部分,喀拉喀什河的干河床(照片1)向北延伸最远可到麻扎塔格以南20公里的地方。沙漠中南部则为玉龙喀什河、克里雅河、

尼雅河、牙通古斯河、安迪尔河和喀拉米兰诸河的三角洲；其中克里雅河三角洲可深入沙漠内部 300 余公里。沙漠的东部系塔里木河下游、孔雀河下游的三角洲及罗布泊的湖积平原。沙漠的东南部为车尔臣河的冲积平原。塔克拉玛干沙漠的北部则为古代及现代塔里木河的冲积平原，呈东西走向延伸的古塔里木河河床（照片 2）可见于现代河床以南 80 至 100 公里的沙漠中。而沙漠西部则为源出帕米尔和西昆仑山一些河流的三角洲组成，如喀什噶尔河，盖孜河，叶尔羌河和提孜那甫河等。正是如此，所以沙漠风成沙的重矿物成分和其下伏沉积物之间有着相似之处，如塔克拉玛干沙漠南部由于昆仑山地区大部以片麻岩、片岩、千枚岩等为主。因此，源出于昆仑山诸河流下游冲积物的风成沙重矿物组成与下伏沉积物有着共同性，角闪石含量在 30—72%，其次为云母和绿帘石及金属矿物。而在沙漠北部的沙物质重矿物组合中，角闪石含量较低（20—30%），而云母成为主要的成份（40% 以上）。正是由于沙漠的原始地面为疏松的沙质沉积物所组成，所以在干旱气候条件下受风力的吹扬搬运堆积作用，便成为沙漠沙物质的主要来源。

关于风的情况根据气候资料的分析，大致在伽师至民丰之间的连线以南的地区，主要受西北风及西北西风的作用，而在该线以北则为东北风及东北东风作用的地区。至于邻近山地的山麓地带尚有地方性风的影响，如天山南麓的偏北风和于田且末间山前平原的偏南风及西南风等等。然而也需指出在气流具体作用于风沙地貌形态的过程中，并不是所有的风都对风沙地貌形成发育有关，只有能把沙子吹扬搬运的风才能当作对风沙地貌形成发育的有效风。根据  $\geq 5$  米/秒（离地面 12 米高）起沙风的统计和邻近气象站地区沙丘形态分析的结果得出：

1. 风沙地貌形态轮廓的总特征和起沙风风信情况的复杂程度有关，不同的风信情况具有着不同的形态特征。在单向风的地区一般以新月形沙丘、沙丘链为主，如沙漠西南部和东部等地。在具有多种风向而风力又大致相似的地区出现有金字塔沙丘，如沙漠南部于田且末之间等。而在两组风向相交，交角又不大的情况下，则出现新月形沙垄。在两组相互垂直风的作用下，则以格状沙丘为主。

2. 风沙地貌形态的排列方向（以沙丘的迎风坡方位角来表示）和起沙风合成风向大体相一致，但不完全符合，而有一交角。交角的大小和起沙风风信情况复杂的程度有关，在风向较为单一的地区：如莎车、皮山、若羌等地，角度都较小，一般在  $1—5^{\circ}$  左右。而在风向较为复杂的伽师、麦盖提、民丰等地，角度较大，在  $9—15^{\circ}$  之间。

风固然是风沙地貌形成发育的一个重要因素，但也受各地自然条件的影响。因此即使在同一风信情况下，风沙地貌的形态仍有差异。以策勒为例虽然都是在西偏北风的作用下，但风沙地貌形态自南而北却显然不同，南部为稀疏的新月形沙丘及沙丘链，中部为灌丛沙堆，北部为高大而密集的沙丘链。而这三个不同形态的沙丘带，实际上反映了三种不同的自然条件，南部为水分条件极差，无植物生长的沙砾洪积扇（戈壁），沙源供应也较少，因而形成低矮而稀疏的新月形沙

丘。中部为洪积扇前缘潜水位较高，并有间歇性流水的沙质平原，植物生长较好，广泛发育怪柳灌丛沙堆。而在北部现代流水不能到达的古代河流冲积的沙质平原地区，一方面由于深厚的沙层提供了较多的沙物质来源，另一方面水分条件较差，植被稀疏，形成了高大密集的沙丘链。正是这样，所以在分析风沙地貌的形成发育时，便不能只考虑气流的情况，而是要把风沙地貌分布地区的自然条件联系起来进行全面考虑。

除了风以外，对塔克拉玛干沙漠风沙地貌形成发育有关的自然条件主要有地面物质组成、地面的起伏和水分植被情况等，现分别加以说明：

1. 地面组成物质的影响，其实质在于沙子供应量的多少，它关系着沙丘形态发育规模的大小。在山前砾石平原上，一方面由于受地表砾石的掩护，在一般风力下不易起沙。另一方面在近地面层深度内以粗沙及砾石为主，细沙中沙较少。以墨玉西南为例，在0—50厘米深度内砾质占65%，沙质仅占35%。因此，对复盖其上的沙丘沙的物质供应就不很充足，一般都形成低矮而稀疏分布的沙丘。而在沙质平原地区，由于都为各种不同粒级的沙子所组成，沙源丰富，只要到达 $\geq 5$ 米/秒起沙风时，就能起沙，因此，对于复盖其上的沙丘沙的物质供应较为丰富，一般都形成较为高大而密集的沙丘。正是如此，所以塔克拉玛干沙漠边缘分布在山前砾石平原上的沙丘都较低矮，而在沙漠内部分布在沙质平原上的沙丘都较高大，表1的数值便是说明了这种情况：

表1. 分布在不同物质组成地面上的沙丘高度情况

地面物质组成	沙丘高度 (米)				
	且末	民丰	墨玉	皮山	莎车
沙质平原	10—20	10—20	15—20	10—20	8—15
砾石平原	0.5—2	1—5	1—3	0.5—2	1—3

2. 地面起伏影响的实质在于使近地面风沙流运行发生改变，造成沙丘形态的差异，特别是山岭的起伏往往成为风沙流运行的障碍，在其迎风侧发生沙子大量的堆积，形成巨大的沙山。如麻扎塔格横贯塔克拉玛干沙漠西部的中央，成为东北风运行的阻碍，在山地北侧沙子大量堆积，发育许多高大沙丘，一般都在50—100米，愈靠近山地，沙丘相对高度愈大。以麻扎塔格西段利用航空相片分析所得资料为例(表2)可以看出这种特征。

表2. 麻扎塔格西段北麓巨大沙丘复合体高度的变化

由北而南沙丘离山顶的距离(公里)	6.0	4.8	4.2	3.6	1.8
沙丘复合体高度(米)	58	74	84	86	94

同时在沙丘形态上自北而南也有显著变化,自一般的沙丘链转变为迭置的复合型沙丘链,而在邻近山前地带,由于气流受山体影响产生局部气流,使巨大复合型沙丘链的顶部又呈现出若干金字塔状的形态,沙丘形态自北而南由简单转变为复杂。

地面起伏对风沙地貌形成发育的另一个影响是成为若干巨大沙丘的基础,特别是在一些残丘起伏的地区,风成沙的复盖使它们的高度高出周围地区的沙丘,造成一些特殊的形态,如沙漠南部于田且末之间的一些大沙丘大部和下伏切割残余的扇形地有关。沙漠西北部的高大沙丘则和蚀余残山有关,高度可达250米左右。

3. 水分植被情况: 诚如前面所曾提及的塔克拉玛干沙漠是分布在不同的地貌部位上,有的是冲积平原,有的是三角洲,有的是洪积冲积扇前缘,而这些不同的地貌部位都影响着水分植被条件。在洪积冲积扇前缘地带由于潜水位较高,一般深1—3米,因此植物生长较好,分布着密集的柽柳灌丛和胡杨。在深入到沙漠中去的河流两岸冲积平原及三角洲地带,由于暂时性流水(洪水)的影响,或干河床沿岸地带潜水位较高(一般在2—5米)的关系,胡杨柽柳密集成为沙漠中的绿色地带(照片3),如和田河下游、克里雅河下游、尼雅河下游、牙通古斯河下游和安迪尔河下游等。正是由于这些地区生长着密集的植物,因此沙丘形态多为固定及半固定的灌丛沙堆。而它的分布规律是沿着河流两岸随河床蜿蜒曲折作带状分布(照片4),如塔里木河,克里雅河等。有些地区则沿洪积冲积扇前缘呈扇状分布,如若羌至民丰之间的昆仑山北麓扇缘地带等。正是灌丛沙堆的存在依赖于水分和植物,所以从它们的分布及植物生长情况也可推论各地水分条件和水系的变化。如塔克拉玛干沙漠西南墨玉以北和田河以西的地区,根据柽柳灌丛沙堆沿干河床作带状的扇形分布的特点,大致可以看出过去喀拉喀什河三角洲的范围。在皮山以北的博斯塔克河及科什塔格河地区同样可从灌丛沙堆分布的范围确定古三角洲的范围。此外,从灌丛沙堆地区胡杨柽柳等生长的幼年,壮年和老年情况还可判断出于三角洲上河流变化的趋势,这从克里雅河下游三角洲的胡杨柽柳在西部的生长较为衰老枯萎,东部生长茂盛,具有大批幼年林分布的特征,可以反映出河流的变化是有着自西向东迁移的趋势。尼雅河下游,牙通古斯河下游也有类似的情况。特别是从荒漠河岸林—胡杨林年轮的变化可以具体反映河流变迁的时间过程。

这里也需指出,在一些很古老的干河床沿岸,由于长时期没有流水经过,潜水条件也随着变坏,两岸植物大部分枯死,灌丛沙堆受风力剧烈吹扬而破坏,同时沙质干河床又提供沙源,形成这些地区流动沙丘和灌丛沙堆同时并存的景观。不仅如此,而且沙质干河床所提供沙源就地形成的沙丘又受河床的影响,呈现蜿蜒曲折带状分布的形式,如克里雅河的最下游和和田河的最下游等。

由上分析可以看出塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成发育是在于旱气候条件下风和沙质地面相互作用并受地面形态,水分植被条件,沙源供应影响下的产物。但在沙漠边缘及绿洲中沙丘的形

成是和人类经济活动有着密切的关系。在这些地区或系固定半固定的灌丛沙堆因樵柴等原因破坏植被,导致着流动沙丘的形成,如洛浦、喀什、莎车等绿洲中的沙丘等。或由于沙质地表植被破坏后受风力吹蚀提供沙源,在其前方发生堆积,如岳普河下游及疏勒牙甫泉等地。或系河流改道遗留有沙质干河床受风力吹扬就地起沙形成沙丘如麦盖提英吉沙等绿洲内的流沙等。也有一些地区由于人为原因河流改道或上游大量用水,影响下游灌溉水源的断绝,导致绿洲和城市的废弃,沙漠中出现一些古城如老达木沟、尼雅古城(照片5)、喀拉塘格古城等。正是由于现代绿洲附近或废弃的古代绿洲地区流沙的形成,主要受人为经济活动破坏脆弱的干旱地区生态平衡之所致,而且都形成于历史时期,因而我们称之为“沙漠化土地”。这种沙漠化土地的共同特征是:

1. 另星分布于居民点或耕地附近,或成片状分布于绿洲边缘,或分布于沙漠内部河流沿岸绿洲的周围。

2. 历史时期所形成的沙漠化土地主要分布在沙漠内部河流下游三角洲上废弃的古代绿洲及其附近地区,而且有大量历史时期人为活动的痕迹,如城市居民点耕地渠道等痕迹。

3 沙丘形态简单,大部系高度在10米以下的新月形沙丘及沙丘链为主,并有吹扬的灌丛沙堆分布其间。

初步统计,这种沙漠化土地仅占整个沙漠面积的9.2%。因此可以认为:塔克拉玛干沙漠风沙地貌的形成主要是在干旱气候条件下由于自然因素所形成。历史时期所形成的沙漠化土地只是局部的。

综上所述,可以看出塔克拉玛干沙漠风沙地貌的分布显然有着下列几个特点:

1. 在沙漠西南部即伽师—民丰一线的西南,自北而南,沙丘迎风坡的方向由朝向西北及北北西渐转变为朝向西及西北西。而在该线的东北,沙丘迎风坡的总方向虽朝向东北,但在沙漠中央地带自东而西微有差异,在东部迎风坡向东北东,向中部及西部逐渐转变为东北及北北东,而在麦盖提以东的麻扎塔格以南地区则转变为朝向正北。

2. 在沙漠内部除了深入到沙漠中去的一些河流两岸有固定半固定灌丛沙丘分布外,全为裸露的流动沙丘所分布。在沙漠边缘间歇性流水的河流两岸及山前洪积冲积扇前缘地下水位较高的地区,则分布着密集的稳定、半固定灌丛沙丘。

3. 沙丘类型复杂的地区,主要分布在沙漠西部麻扎塔格南北两则,北民丰隆起附近及沙漠南部且末于田之间的地区等,这种情况或与地面起伏山岭耸峙有关,或与风向复杂有关。

4. 巨大沙丘复合体主要集中在沙漠东部塔里木河下游以西,克里雅河以东的地区,此外在麻扎塔格以北一带也有分布。而低矮沙丘主要分布在沙漠边缘山前洪积扇的砾石平原上。

### 三. 风沙地貌形态特征的定性分析



风沙地貌形态的形成和发育是取决于上述这些因素相互作用的结果。然而这些因素在各个地区都不一致，因此使得塔克拉玛干沙漠风沙地貌形态相当复杂，这种复杂的情况可以从定性及定量两个方面来分析。

从风沙地貌形态的定性分析来看，在塔克拉玛干沙漠除了一般沙漠所常见的沙垄新月形沙丘及沙丘链外，还广泛分布着很多形态复杂的沙丘，约占整个沙漠面积的 $1/2$ 左右，其中尤以复合新月形沙丘链的分布面积为最大，其次为复合型纵向沙垄和鱼鳞状沙丘群，此外还有金字塔状沙丘和穹状沙丘分布于特定的自然条件下。对于这些复杂形态的沙丘，虽然目前我们还缺乏它们形成发育的动态资料，不能说明其形成的原因，然而根据航空相片分析和地面考察的资料，对它们的形态特征还是能够得到一个初步的了解。

#### 1. 复合新月形沙丘及复合型沙丘链：

主要分布于沙漠内部，总特征是：沙丘高大，在巨大沙丘的迎风坡上层迭置着新月形沙丘链，而以顶部为最密集，整个巨大沙丘复合体的走向和优势风向大致相垂直或成 $60^\circ$ 至 $90^\circ$ 的交角，但若进一步的分析，其形态又可分成为下列几种：

第一种是复合型沙丘作单个分布，一般高20至40米，在平面图形上为一完整的新月形（照片6），在剖面图形上虽成一对称的斜坡，但背风坡并不十分高大，次一级沙丘的排列方向和复合体方向相一致。往往都作孤立的分布，如塔里木河下游沿岸及克里雅河三角洲的东南均有这种沙丘的分布。

第二种是复合新月形沙丘已彼此相连成链状（照片7），但较平直，圆弧体不很明显，横向延伸一般在1至3公里左右，宽度一般在300至500米，在剖面图形上成不对称的斜坡，但陡峭的落沙坡不十分显著，且较低矮，其顶部尚未和复合体的顶部相符合，丘间地较为狭小，一般都伴生着低矮的沙丘。在沙漠西南皮山科什塔格河三角洲以北及墨玉喀拉喀什河三角洲以西的地区都有这种沙丘的分布。

第三种复合型沙丘主要成横向延伸很长的链状（照片8），一般自5公里至15公里不等，最长可达30公里左右，宽度在1000至1500米，高度一般在50至100米，也有在100至150米者，也可称之为复合型沙山。整个沙丘体较为平直，排列规则，圆弧体不十分显著。在剖面图形上斜坡两侧很不对称，具有高大明显的陡峭落沙坡，其顶部已和复合体的顶部相重合，但复盖其上的次一级沙丘链的走向并不和复合体走向相一致，往往成 $30^\circ$ 以下的交角。丘间地较为开旷，宽度在1—2公里左右，延伸较长，但为一些与沙丘复合体相垂直的低矮沙丘所分隔，形成一个个闭塞的洼地，部分地区还遗留有湖泊的残余（照片9）。丘间地尚有稀疏而低矮的沙丘分布。在沙漠东部塔里木河下游和车尔臣河之间的广大地区都为这种复合形沙丘链所分布。

第四种复合型沙丘链主要分布在沙漠西北部麻扎塔格以北的地区，其形态总特征虽然和前一

种类型有着相似之处，如沙丘高大平直，横向延伸很长，有着显著的不对称斜坡等。但它也有着独特的形态特征，首先是巨大沙丘复合体表面所复盖的次一级沙丘链的排列并不很规则。形态上除了一般的沙丘链外，还有着鱼鳞状的沙丘，特别在复合体的顶部还有着金字塔状的形态，第二是高大陡峭的落沙坡并不和复合体沙丘的顶部相重合，而是在落沙坡顶和复合体顶部之间的斜坡上分布着密集而低矮的次一级沙丘。第三是复合体与复合体之间的丘间地也较为狭窄，一般宽度在 300—500 米左右，但为密集的沙丘链及格状沙丘链所分布。

## 2. 复合型纵向沙垄（照片 10）：

主要分布于沙漠中部东经  $82^{\circ}$  至  $85^{\circ}$  之间的地区及麻扎塔格以南皮山以北的地区。其排列方向和主风向相平行或成  $30^{\circ}$  以下的交角，沙垄延伸很长，一般在 10—20 公里，垄体表面复盖着许多迭置的沙丘链，垄高一般在 50—80 米，垄间地常分布有低矮的沙丘，高度在 10 米以下。复合型纵向沙垄虽有这些总的点，但形态上仍有局部差异。主要可分为两种：

第一种是垄体较为狭长平直，两侧斜坡微不对称。皮山以北的巨大纵向沙垄属于本类型。

第二种复合型纵向沙垄虽也狭长，但下风方向的前端较为细长而尖锐（照片 11），如和田河下游与克里雅河下游之间地区的沙垄便是显著的例子。

## 3. 金字塔沙丘：

也有称为角锥状沙丘（照片 12），一般都分布得多方向风，而且各种方向的风力都相差不大的地区，特别是在下伏地面微有起伏或邻近山岭的地带，发育更为显著。正是如此，它的分布范围仅限于且末和于田之间，麻扎塔格以北及巴楚东部的一些残山附近，在形态上它具有三角形的斜面（坡度一般在  $25^{\circ}$  至  $30^{\circ}$  左右），尖锐的顶和狭窄的棱脊线，丘体高大，一般在 50 至 100 米，但也有高达 100 米以上和低于 50 米者。其棱面往往代表着一种风向，在民丰且末之间一般都有 3—4 个棱面，反映着东北风，西北风和来自昆仑山的西南风或南风的影响。

## 4. 鱼鳞状沙丘群（照片 13）：

这种沙丘广泛分布在塔克拉玛干沙漠西部及西北部，其特点是沙丘不作个体分布，而是成密集的群体分布。丘间地不很明显，前一个沙丘的迎风坡起点即为后一个沙丘背风坡麓。若从群体上每一个个别形态来看，则沙丘与主风向相垂直，两翼顺风向延伸和其前方沙丘的迎风坡相连，造成沙丘与沙丘之间顺风向延伸的沙埂，因而从整个沙丘群来观察，则具有着与主风向相平行的纵向沙丘形态特征。

## 5. 穹状沙丘（照片 14）：

主要分布在沙漠北部塔里木河的老河床以南和沙漠东部巨大复合型沙丘链区以北的地区，其形态特征是：沙丘两侧斜坡较为对称，次一级沙丘层层迭置其上，没有明显而高大的曲弧状落沙坡，高度一般在 40—60 米之间。平面图形成园形或椭圆形，一般都成零乱不规则的个体分布，

部分地区也有相连，但仍保持每个穹状体的形态。

塔克拉玛干沙漠的风沙地貌是由上述这些不同类型的沙丘复合体和一般常见的新月形沙丘链（照片 15）所组合而成。至于沙漠边缘风向单一稳定，沙源供应并不丰富的洪积扇砾石平原上，一般都为发育不久的低矮新月形沙丘及其初期诸形态（照片 16）（包括饼状沙丘、盾状沙丘及锥形新月形沙丘），新月形沙丘，沙丘链所组成。如沙漠的西南边缘便是明显的例子。而在两种风向呈锐角斜交的情况下，新月形沙丘的一翼顺着较强的一种风延伸出去，成为新月形沙垄（照片 17），如继续发展下去，往往会使尾部的新月形沙丘形态变得不明显，甚至消失，仅遗留下由一翼延伸所成的沙垄，在且末东部这种沙丘分布最为广泛。在洪积冲积扇的前缘及间歇性河流沿岸水分植被条件较好的地区。如皮山、墨玉、策勒以北及塔里木河沿岸，则以怪柳灌丛沙丘为主（照片 18）。但在植被破坏的情况下，则有裸露沙出现，在风力作用下，顺优势方向风在灌丛沙堆下风方向形成沙垄。

虽然塔克拉玛干沙漠具有上述这些沙丘类型，但从其形态和风的关系来看，可以归纳为三种基本类型：

#### 1. 横向沙丘：

即沙丘形态的走向和起沙风合成风向相垂直，或成 $60^{\circ}$ 至 $90^{\circ}$ 的交角，如复合新月形沙丘，复合型沙丘链，新月形沙丘链等。

#### 2. 纵向沙丘：

即沙丘形态的走向和起沙风合成风向相平行或成 $30^{\circ}$ 以下的交角，如复合型纵向沙垄，沙垄和新月形沙垄等。

#### 3. 多方向风作用下的沙丘：

即沙丘形态的发育系在起沙风风向复杂而风力又大致相似的情况下，形态本身不与任何一种方向风相平行或垂直，而是具有着不同方向的棱脊线和斜面，金字塔沙丘是最典型的代表。

### 四．风沙地貌形态特征的定量分析

沙漠地区风沙地貌形态的定量分析可以用两个示量指标来衡量。一为起伏度，一为疏密度，前者表示沙丘的高低起伏程度，后者表示沙丘分布的疏密程度，它们无论在反映风沙地貌形态特征或在评价沙漠改造利用地貌条件等方面都有着重要的意义。

风沙地貌的起伏度是以一个地区沙丘高度的平均值来表示。根据航空相片分析的结果可以看出在每一个地区内的沙丘虽然有着不同的高度，但其中有很大一部份沙丘是比较集中在某一高度范围内，如以皮山西南砾石平原上的沙丘为例，有 64.5% 的沙丘集中在高度 0.5—1.0 米范围内。莎车西部的布古里沙漠东南也有 61% 的沙丘集中在 3—8 米高度范围内。因此在分析每个地

区的沙丘高度时，可以用该地区沙丘高度的数学平均值作为标准，这个平均高一般都处于该地区沙丘面积分布最为广泛的一个高度级内（图1）， $\bar{H}$ ：沙丘高度平均值 S：标准差 V：变动系数

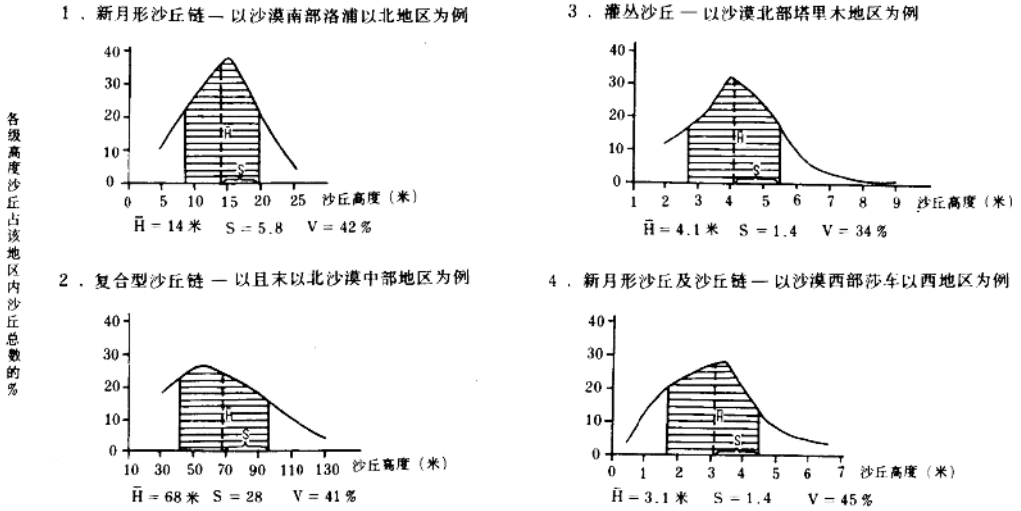


图1·塔克拉玛干沙漠若干代表性地区（样方）沙丘高度平均值的特征

利用这个数值可以看出塔克拉玛干沙漠风沙地貌起伏度的基本情况（表3）。

表3 塔克拉玛干沙漠各级沙丘起伏度的分布

沙丘起伏度的分级(以高度平均值米来表示)	占沙漠面积的百分比	累积值
< 5	13	13
6 - 10	17	30
11 - 25	18	48
26 - 50	14	62
51 - 100	28	90
100以上	10	100

沙丘高度的分析不仅仅是反映塔克拉玛干沙漠风沙地貌的起伏程度，而且还有着地貌意义。

1. 沙丘的高度可以反映出各地沙漠地貌形成过程时间的长短。一般来说在裸露平坦地表条件下，形成时间较长的沙丘，由于长时期来风沙流作用，沙子堆积的结果，形态规模也就比较高。而发育不久的沙丘，由于风沙流作用沙子堆积过程较短，一般都比较低矮。正是如此，所以从各地沙丘的高低（有下伏隆起或丘陵者除外）也可反映出各地沙丘形成发育相对时间的长短。据此可以看出塔里木河下游以西塔克拉玛干沙漠东部沙丘发育的时间相对的较其他各地为长，也

就是说东部沙漠的发育历史最早。

2. 沙丘高度可以反映形态发育规模的大小，因为形态发育规模可以用沙丘的高度(H)、长度(L)和宽度(W)来表示，而这三者之间不论是哪种类型的沙丘都是成直线相关。根据若干典型地区对不同类沙丘进行量计分析的结果，它们之间的关系有如下列回归方程所示：(图2)

新月形沙丘

(以皮山西南为例)

$$L = 15.84H + 3.8$$

$$r = 0.99$$

$$W = 18.82H - 1.38$$

$$r = 0.96$$

灌丛沙丘 (以塔里木河中游塔里木地区为例)

$$L = 10.7 + 6.2H$$

$$r = 0.97$$

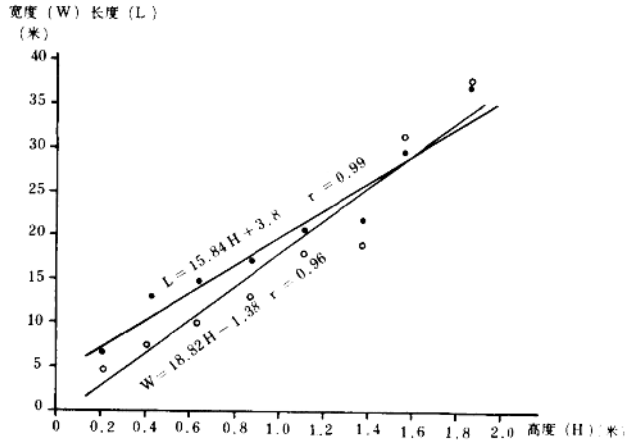
$$W = 4 + 6.4H$$

$$r = 0.99$$

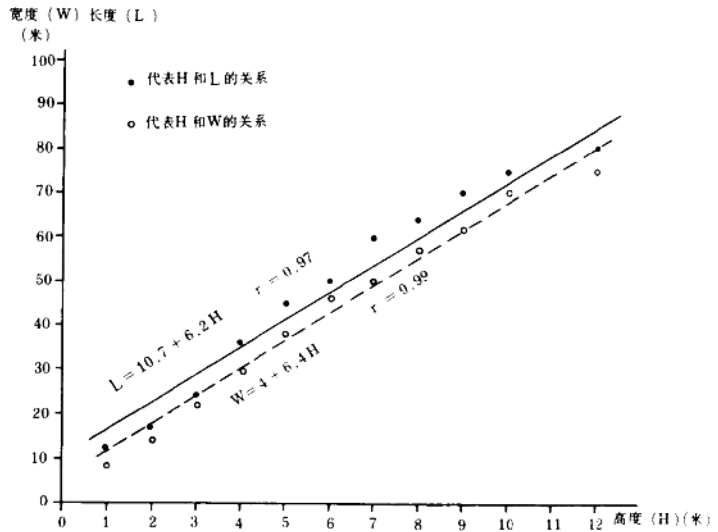
复合新月形沙丘 (以塔里木河下游英苏一带为例)

$$L = 121 + 7.7H \quad r = 0.98$$

$$W = 50.5 + 16.5H \quad r = 0.93$$



1. 新月形沙丘—以皮山绿洲西南为例 (65个沙丘的资料)

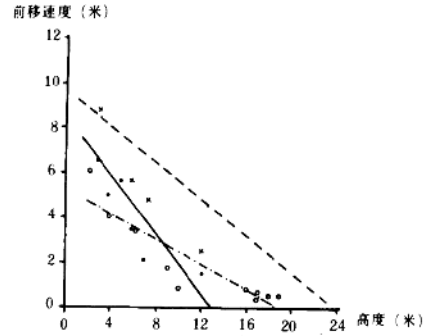


2. 灌丛沙丘—以塔里木幸福城附近为例

图2·沙丘形态各示量值的相关

3. 沙丘的高度可以反映风力作用下沙丘形态变化程度的大小。沙丘形态的变化以风的作用为转移, 低矮沙丘由于其形态适应于新的风信情况的时差较小, 所以它能改变原来主风作用下的形态, 使其形状发生根本的转变。而高大的沙丘由于形态适应于新的风信情况的时差较大, 往往不能很快改变主风所造成的形态, 因此在巨大沙丘体顶部除了反映新风向所形成的脊线变化外, 仍保持着原来主风所造成的基本形态; 至于丘体的基本轮廓和坡麓部份则较稳定, 变化不十分显著, 正是如此, 所以沙漠内部的沙丘复合体形态变化程度较边缘低矮沙丘来得缓慢。

4. 沙丘的高度也反映着沙丘运动强度的大小, 特别在同一风信同一自然条件的情况下, 高度的差异往往是沙丘移动强度大小的主要因素, 它们之间是成直线的反比相关(图3), 所以从塔克拉玛干沙漠各地沙丘高度的分布情况也可以看出沙丘移动的程度。



风沙地貌的疏密度一般是以单位面积内的沙丘数来表示, 单位面积内的沙丘数愈多, 表示愈密集, 反之则愈稀疏。但由于沙丘体积大小的差异, 有的地区虽然沙丘数分布很多, 但体积都很小, 而有的地区沙丘数虽然不多, 但体积较大, 图3·沙丘前移值与沙丘高度的相关关系

沙丘在该地区内实际所占面积的百分比较高。如以沙漠北部塔里木河北岸某两个地区为例, 其中一个地区是沙丘低矮, 虽然每平方公里内沙丘数达185个之多, 但所占该地区的面积百分比仅4.7%。而另一个地区的沙丘数每平方公里仅107个, 但沙丘较高大, 所以占该地区的面积百分比前者为大达9.6%。因此单纯以单位面积内沙丘分布数值的大小来表示疏密程度并不完全适宜。为此采用以一个地区内沙丘复盖地面程度的大小来表示, 其示量值的计算可采用下式表示:

$$B = \frac{W}{W+w}$$

式中B代表疏密度的示量值、W代表该地区内沙丘丘体平均宽, w代表该地区内沙丘丘间地平均距离, 数值愈大表示沙丘密度愈大, 反之则愈小。根据上述方法计算的结果, 塔克拉玛干沙漠疏密度的情况有如表4所示:

表4. 塔克拉玛干沙漠各级沙丘疏密度的分布

沙丘疏密度分级	各级疏密度的沙丘占整个沙漠面积的%	累积值
< 0.20	4	4
0.21 - 0.40	30	34
0.41 - 0.60	45	79
0.61 - 0.80	11	90
> 0.80	10	100

从沙丘疏密度的分析可以看出如下几个特点：

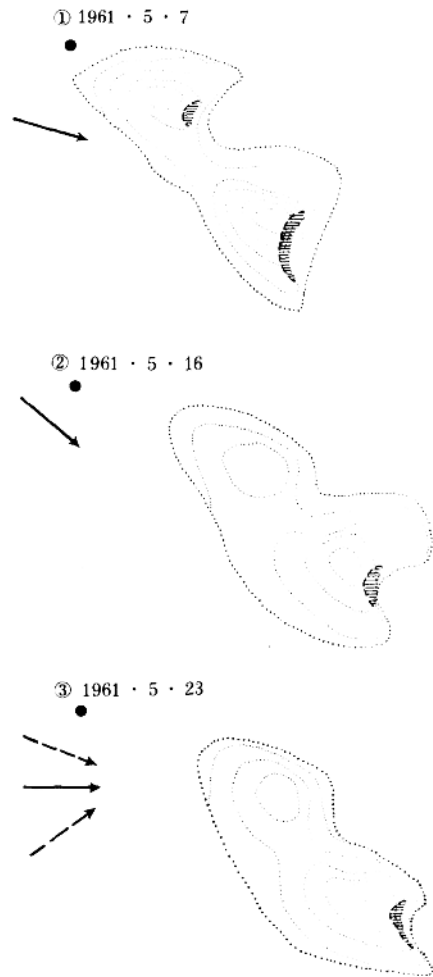
1. 从沙丘疏密度大小分布的总趋势来看，东部及中部密度较小，一般在 0.21—0.40，密度最大的是在沙漠西北部及克里雅河下游与和田河下游之间的地区等，一般都在 0.80 以上。

2. 各种不同类型的沙丘有着一定的疏密程度，一般来说在巨大的复合型沙丘链地区疏密度一般都保持在 0.30—0.40 之间。复合型纵向沙垄的地区则保持在 0.41—0.50 之间。沙丘链一般在 0.40—0.60 之间。而在鱼鳞状沙丘群分布的地区一般在 0.80 以上。

## 五. 风沙地貌发育过程中形态变化的特征及沙丘的移动

需要指出上述这些沙丘在其发育过程中形态在不断的变化，这从皮山西南所测得的风季时期新月形沙丘形态变化的典型资料中可以看出（图 4）：风在形态塑造过程中起着显著的作用，其中变化最显著的部分则为落沙坡顶部或脊线，较稳定的则为沙丘的基部及坡麓线。至于变化程度的大小则受沙丘本身体积大小的影响。根据观测资料表明：沙丘体积小，风力作用下的形态变化也愈显著，反之高大的沙丘形态变化就很缓慢。正是这样所以塔克拉玛干沙漠中的巨大复合型沙丘形态的变化就不十分明显，只是在风季时期丘顶作暂时性的变化；而对边缘的低矮沙丘来说，风季前后及风季过程中的形态就有着显著的改变。

虽然高大沙丘与低矮沙丘的形态变化程度有所差异，但无论何种形态的裸露沙丘，都往往以丘顶的变化作为最敏感的指标，而丘顶的变化不仅反映在脊线的摆动，次生小落沙坡的发生或消失，更重要的是表现在沙丘高度的变化。观测的资料表明：高度的变化是随着沙丘发育过程中每一次风作用下风力大小，沙子供应量多寡以及两者之间适应的程度大小而有所变化，这从皮山西南裸露



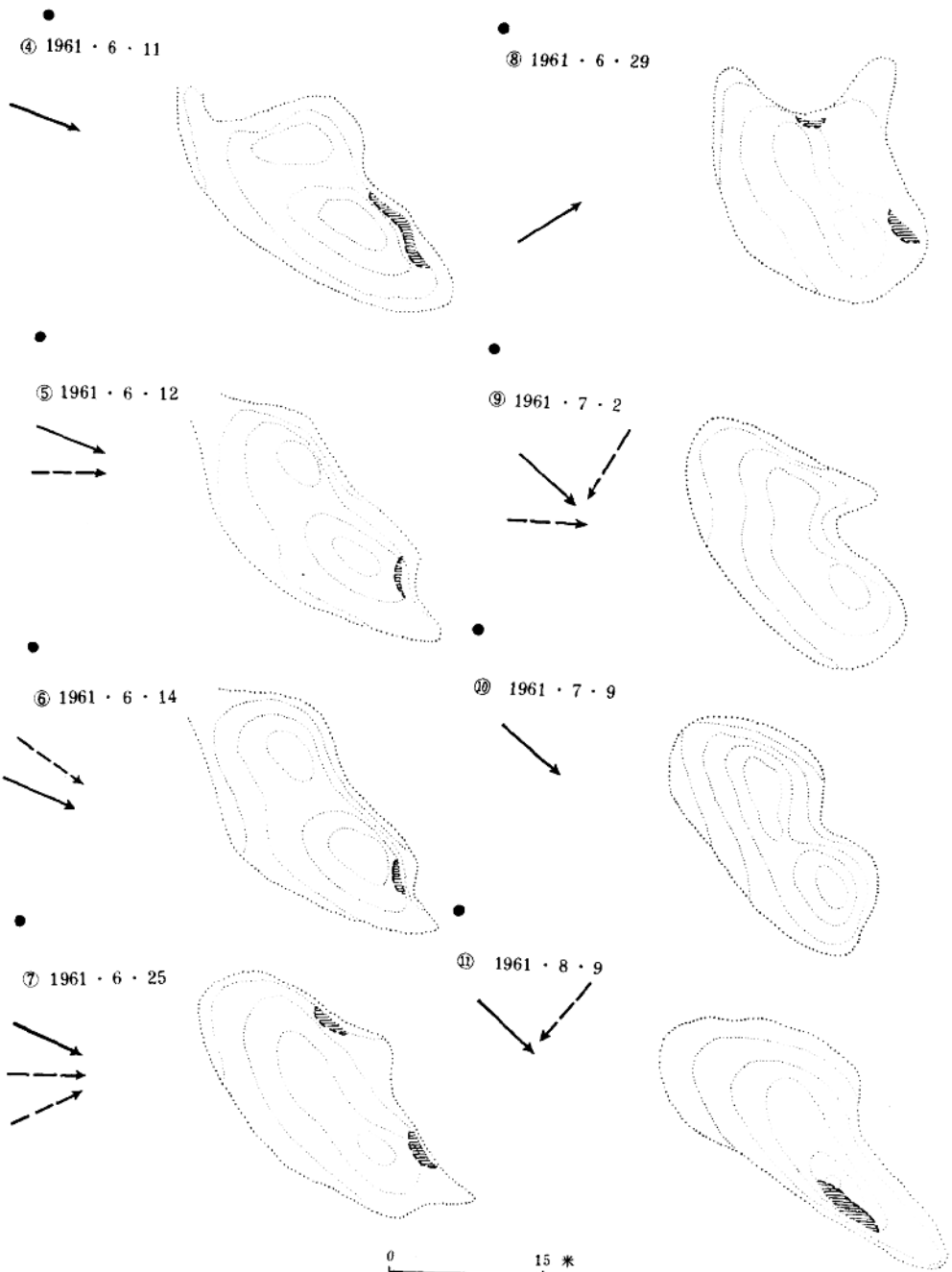
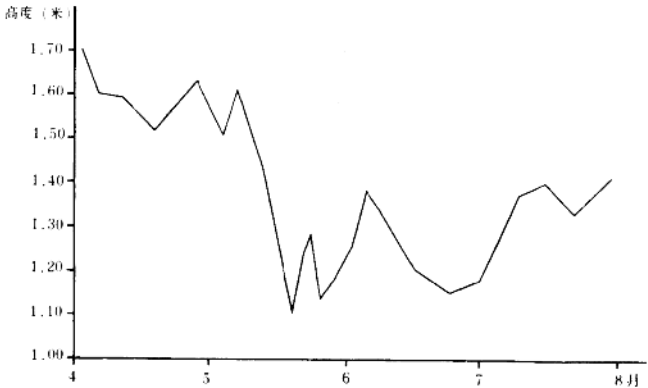


图4 · 风向对沙丘形态的变化 (皮山绿洲西部)



平坦沙砾地表上风季时期新月形沙丘发育过程中高度变化的情况可以说明(图5):当沙丘迎风坡表面沙子吹蚀量小于背风坡堆积量时,沙丘高度增大。当在迎风坡吹蚀量大于背风坡堆积量时,则沙丘高度减低。不仅如此,而且沙丘疏密度的数值,特别是丘间地距离也随着沙丘发展过程中由于沙丘本身体积大小所造成沙丘前移速度的不同而有所变化,以皮山西南新月形沙丘为例,在



1961年5月7日五号沙丘与八号沙丘相距为48米,但由于两者前移值的差异,五号沙丘大于八号沙丘,因而使两者之间距离缩短,至1962年7月30日间距减至27米,以上是属于大沙丘排列在小沙丘前方的情况下,反之,如后方沙丘体积较大,而前方沙丘较小,那么不断前移的结果会使两者间距愈来愈远。

风力作用下不仅影响沙丘形态的变化而且也造成沙丘的移动。至于移动的方向决定于风向,根据风信情况的分析,在塔克拉玛干沙漠东部,东北部,东南部,北部及中部以东北风为主,因此沙丘大致由东北移向西南;在沙漠的西部及西南部则以西北风为主,沙丘由西北向东南移动;沙漠的西北部也在东北风的影响下,沙丘也移向东南。在沙漠的南部也受西南风的影响,但风力不大,不能改变西北风和东北风所作用下沙丘移动的方向。至于其移动方式一般都视风向的复杂情况而定,在塔克拉玛干沙漠东部及西南部,分别为单一的东北风与西北风作用下,沙丘均以前进式运动为主,或微有往复摆动的前移:在沙漠西部叶尔羌河西岸的托格拉克沙漠由于受西北及东北两种风的作用,而且其作用的季节分配上也有不同,因此使沙丘呈“之”字形曲折前进的方式移动。

沙丘移动的速度主要受风速的影响,但也和其本身高度有关。从塔克拉玛干沙漠沙丘移动速度总的情况来看有如下几个特点:

1. 沙漠内部沙丘移动慢,沙漠边缘移动快,这和沙漠内部多系高大沙丘,沙漠边缘多为低矮沙丘有关。

2. 风向较为单一的地区沙丘移动速度较风向较为复杂的地区为快,同样高度的沙丘(2米高),在单向风的皮山地区年前移值为12.5米,而在多方向风的民丰东部,其年前移值为9.8米,这是由于多方向的风其能量往往被大量消耗于为塑造适应于新风向的形态过程中,从而大大减少