

腾格里沙漠东南缘格状沙丘的 形态-动力学研究*

哈 斯 董光荣 王贵勇

(中国科学院兰州沙漠研究所, 兰州 730000;

中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710054)

摘要 在世界沙漠中格状沙丘比较常见, 但研究程度很低. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘由 NE-SW 向主梁和与其近乎垂直的副梁构成. 对沙丘区域气流、表面气流、沉积物粒度特征和内部沉积构造等方面的研究表明, 格状沙丘的主梁形成于主风——西北风的作用, 而副梁则是在主梁基础上并由主风和次风——东北风的交替作用下形成的, 其形态-动力学类型应属纵向沙丘置于横向沙丘之上的一种复杂型沙丘.

关键词 腾格里沙漠 格状沙丘 形态-动力学

格状沙丘以纵横交叉的两组沙丘在平面上呈网格状为特征, 它在世界沙漠中分布比较广泛^[1]. 在中国主要分布在腾格里、库布齐和乌兰布和等沙漠区^[2,3]. 许多学者对格状沙丘的分布和形态特征有过研究, 但对其成因目前仍有许多争论, 主要有: (1) 在双向风环境中主风形成主梁, 与主风垂直的次风在主梁间形成副梁^[2]; (2) 在单向风环境中, 横向沙丘兽角部分顺风向延伸形成副梁, 且这种副梁是三维涡旋流辐合处的侵蚀残余体^[3]; (3) 大气边界层中的二维波动流与三维涡旋流在沙质地表上的组合, 因二者强弱变化而生成格状沙丘^[4]等. 关于格状沙丘形态的解释, 多数学者认为主梁为横向沙丘, 争论的焦点在于副梁的形态-动力学类型与形成机制. 为此, 近年来作者对腾格里沙漠东南缘格状沙丘进行了比较系统的研究. 本文通过观测区域气流及其与沙丘形态相作用而产生的表面气流尤其是背风坡次生气流的方向和强度, 分析沙丘表面沉积物粒径与分选参数空间变化, 测定沙丘内部交错层理类型、分布和产状等, 对格状沙丘的形态-动力学类型与机制作一探讨.

1 沙丘形态及区域风况

腾格里沙漠东南缘格状沙丘, 是由走向为 SW-NE 的主梁和与其近于垂直的副梁(SE-NW)组成. 其中, 主梁两坡不对称, 西北坡长而缓($6\sim 12^\circ$), 东南坡短而陡($28\sim 32^\circ$), 丘高 $3\sim 20\text{ m}$, 丘间地不明显, 间距 $30\sim 170\text{ m}$; 副梁叠置在主梁迎风坡, 东、西两坡下缓($4\sim 14^\circ$)上陡($19\sim 30^\circ$), 落沙坡发育不良且局限在背风坡上部丘顶附近, 高度 $1\sim 6\text{ m}$, 间距 $20\sim 70\text{ m}$. 据分析^[5], 格状沙丘主、副梁各自的高度与间距之间具有显著相关. 同时, 据 50 年代以来 3 期航空

相片的对比分析, 格状沙丘总体形态至少在近 40 a 期间保持稳定. 由此可以认为该沙丘在现代气流和沙源环境中处于动态平衡阶段.

确定区域风况的数据取自沙坡头气象站 10 min 风向风速的 3 a 连续观测记录. 其中, 起沙风(5 m/s) 占全年的 12.4%, 且以西北风(WNW-NNW) 为主(占全年 4.4%), 其次是东北风(ENE 占全年 2.2%). 运用 Fryberger^[6] 方法计算出各方向风的潜在输沙率(称为“输沙势”, 单位取矢量单位: VU), 并作出输沙玫瑰图(图 1). 可见, 年输沙风能为 10.8 VU, 合成输沙方向是 S35.3°E, 方向变率达 0.40. 这在区域风能分类中^[6] 属双向低能风况. 其中, 西北风能占 47.6%, 以 WNW-NNW 组方向风为主; 东北风能占 20.3%, 主要为 ENE 方向风. 在季节变化上, 3~5 月为主要风季(占全年 44.4%), 以西北风为主, 东北风次之, 合成输沙方向为 S41.8°E; 6~9 月间, 以东北风为主, 其次是西北风, 合成输沙方向为 S12°W; 10~2 月风能最小(占全年的 18.7%), 以西北风占绝对优势, 合成输沙方向为 S67.4°E.

因此, 格状沙丘发育在双向低能风况. 无论主风向, 还是年、季合成输沙方向, 与主梁走向(235~55°) 垂直或大角度(>50°) 斜交, 与副梁走向(155~335°) 呈小角度(<40°) 斜交. 由此可以认为, 主梁长期处在横向气流环境中, 而副梁则长期处在斜向或纵向气流环境中, 而且又处在高频高能的西北风和相对低频低能的东北风之间.

2 沙丘表面气流特征

沙丘表面气流的方向和强度主要根据用风速仪在沙丘近表面(距沙面 0.5 m 高处) 的观测数据和沙纹迁移方向的测定结果. 根据区域风况, 在西北风和东北风作用时期分别对主、副断面进行了观测. 在观测期间, 风速范围较广(2~11 m/s), 但多数已超过沙粒起动风速.

西北风作用时期, 原始风向与主梁垂直, 与副梁具小角度斜交. 在主梁, 迎风坡上气流和风沙流呈辐射状向丘脊区域发展; 越过丘顶的气流发生分离并在整个背风坡形成弱的反向气流, 致使大量沙粒在此处堆积形成滑落面; 由迎风坡脚至丘顶风速逐渐增加, 在背风坡脚风速剧降至丘顶风速的 40% 以下(图 2(a)). 在副梁, 背风坡除上部狭长区域形成小型滑落面外, 其余部位普遍发育沙纹, 且其走向与丘脊线垂直. 这表明越过丘顶的气流, 在背风坡发生偏转成与丘脊线一致的纵向气流. 副梁迎风坡风速变化与主梁情形相近, 但变化幅度较小; 背风坡由丘顶至坡脚风速逐渐减小但未出现剧降现象, 而且背风坡风速高于迎风坡风速(图 2(b)).

东北风作用时期原始风向与主梁基本平行, 与副梁具大角度(40~70°) 斜交. 此时, 主梁两坡均发育沙纹, 但其总体形态没有发生变化. 副梁背风坡(西坡) 上部形成小型滑落面, 中、

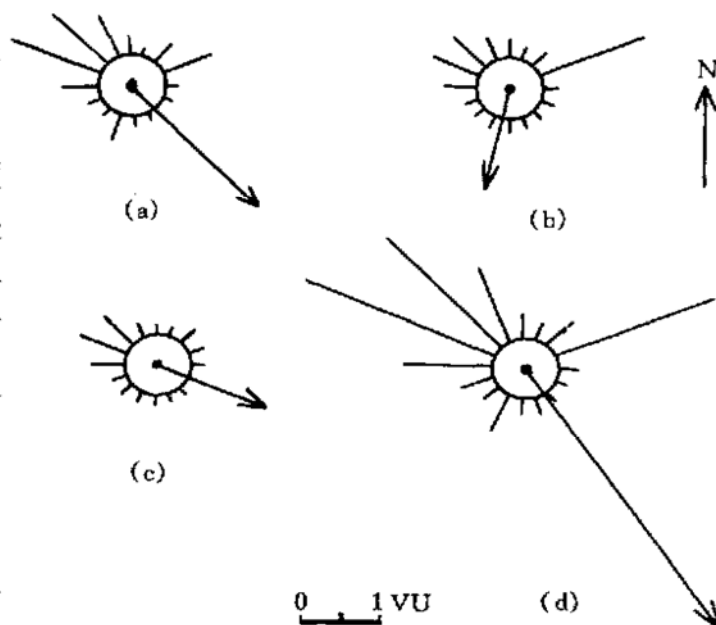


图 1 沙坡头站年、季输沙玫瑰图

(a) 3~5 月份, DP= 4.8 VU, RDP= 2.3 VU; (b) 6~9 月份, DP= 4.0 VU, RDP= 1.4 VU; (c) 10~2 月份, DP= 2 VU, RDP= 1.3 VU; (d) 全年, DP= 10.8 VU, RDP= 2.3 VU

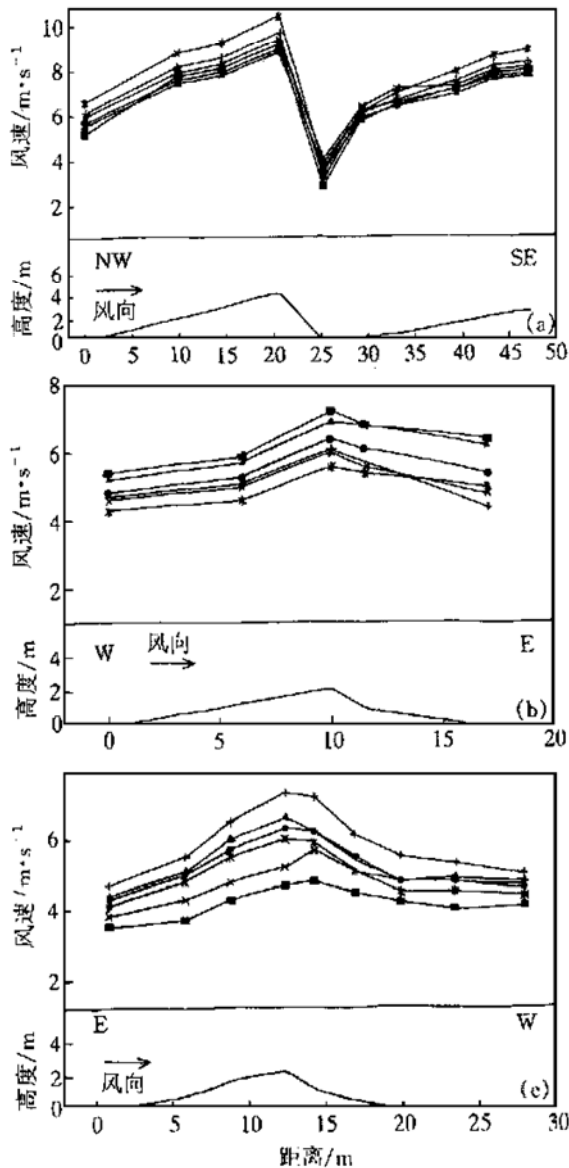


图 2 格状沙丘表面风速变化

(a) 西北风作用时期主梁风速变化, (b) 西北风作用时期副梁风速变化, (c) 东北风作用时期副梁风速变化. 图中符号表示不同次同步观测值

下部仍发育沙纹, 其迁移方向与丘脊线具小角度. 副梁风速的观测结果(图 2(b))与图 2(c)基本相同. 而且, 背风坡风速随原始风入射角的减小而增大: 当原始风入射角为 70° 时, 背风坡脚的风速为丘顶风速的 58%; 而当原始风入射角减小到 25° 时, 坡脚风速则是丘顶的 92%.

上述观测结果表明, 格状沙丘主、副梁在同一区域气流环境中各具不同的表面气流尤其是背风坡气流型式. 主梁处在横向气流条件下, 气流线在丘顶开始分离后在丘间地距背风坡脚一定距离内附体. 因而其背风坡气流以分离流为主, 且强度非常小, 方向与丘顶风向相反. 副梁处在斜向气流环境中, 越过丘顶的气流分离后在背风坡很短距离内附体并偏转成与丘脊线相一致的纵向气流. 因此, 副梁背风坡气流以附体偏向流为主. 由于越过丘顶的气流回到沙丘表面时, 气流线在附体区的汇集, 使此处风速具相对高值(图 2(b)、(c)).

3 粒度特征

共 18 个沉积物粒度样品采自格状沙丘表面与主、副梁脊线相垂直的断面. 分析结果表明, 沙丘沙粒度参数中平均粒径和分选性(标准差)在沙丘断面上具有一定的变化规律, 但在主、副梁间也有明显的差异. 在主梁断面上(图 3(a)), 由两侧坡脚至丘顶区域, 平均粒径变细($2.41 \sim 2.78\phi$), 分选性变好($0.55 \sim 0.26$). 迎风坡平均粒径大于背风坡. 平均粒径在迎风坡脚最粗(2.43ϕ), 在背风坡上部丘顶附近最细(2.78ϕ). 主梁的这种粒径与分选性变化与本

区^[7]、内普德沙漠^[8]、纳米布沙漠^[9]等地区的横向沙丘粒度变化相似. 在副梁断面上(图 3(b)), 平均粒径由两侧坡脚和丘顶向坡中部变细($2.13 \sim 2.62\phi$), 东、西两坡粒径变化具有一定的对称性, 平均粒径在两坡中部最细(2.61ϕ)、丘顶最粗(2.13ϕ); 分选性由两侧坡脚至丘顶变好($0.60 \sim 0.39$). 副梁粒径分布与分选性变化与辛普森沙漠^[10]、卡拉哈里沙漠^[11]和纳米布沙漠^[9]纵向沙丘粒度变化模式基本一致.

4 沉积构造

对 10 余个沙丘内部构造的剖析结果显示, 格状沙丘主、副梁的沉积构造具有明显的区别. 主梁内部沉积主要是高角度板状交错层组(图 4(a)). 单层厚度 $3 \sim 5$ cm, 倾向 $125 \sim 155^\circ$, 倾角 $28 \sim 32^\circ$. 这种层理属落沙坡上沙粒崩滑落沉积的颗粒流交错层^[12]. 在主梁迎风坡还出现薄

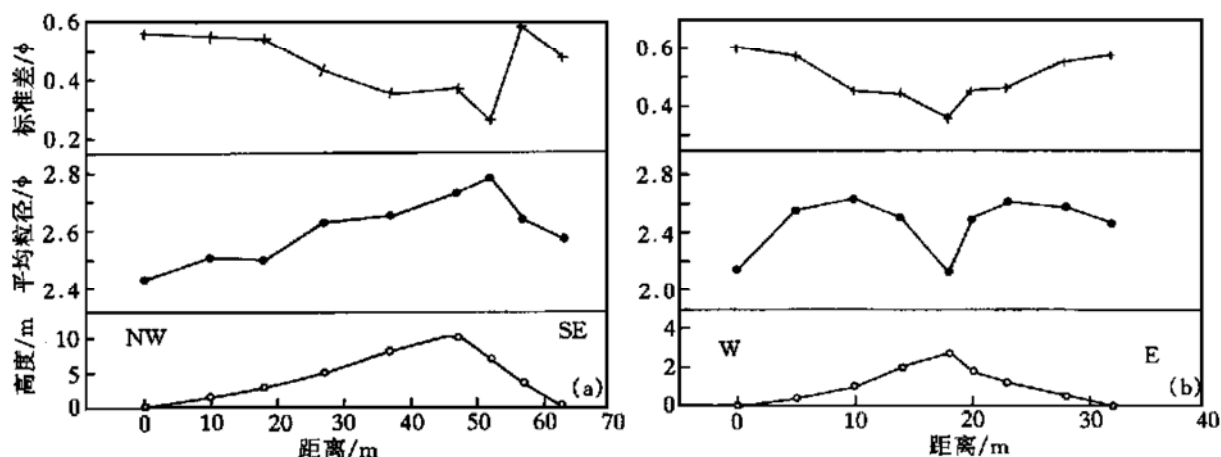


图3 格状沙丘表面粒径与分选参数的变化

(a) 主梁, (b) 副梁. ○示采样点, ●示平均粒径, + 示标准差

层(10~20 cm)低角度平行纹层组,其倾向 310° ~ 330° ,倾角 5° ~ 10° ,属迎风坡沙纹迁移沉积的爬升波痕纹层^[12].副梁内部沉积包括双向倾斜(245° ~ 65°)的低角度板状交错纹理和低-高角度楔状交错层组,其层理线在横剖面上呈人字形(图4(b)).其中,低角度板状纹层与上、下界面近于平行,倾角 6° ~ 17° ,纹层厚度变化很小(1~3 mm)且具逆粒序结构,属爬升波痕纹层;低-高角度楔状交错层理中纹层与下伏界面相切和与上覆界面相割,纹层厚度和倾角均由坡脚(3~5 mm, 15°)至丘顶附近(1~3 cm, 30°)逐渐增加,从而呈向上开口的楔状.这种层理属背风坡气流分离区颗粒流沉积与牵引区沙纹迁移(爬升波痕)沉积之间的过渡类型,因而称为“渐变型交错纹层^[12]”.据产状测量结果(图5),副梁交错层倾向、倾角呈典型双极双峰分布,且以低角度为主.副梁的这种沉积构造与西奈沙漠^[13]、利比亚沙漠^[14]纵向沙丘沉积构造十分相似.

值得一提的是,在副梁剖面底部,还发现上凸形界面,倾向变化于 76° ~ 263° 之间,倾角 5° ~ 12° .其上部为前述人字形交错层理;而其下部则是高角度板状

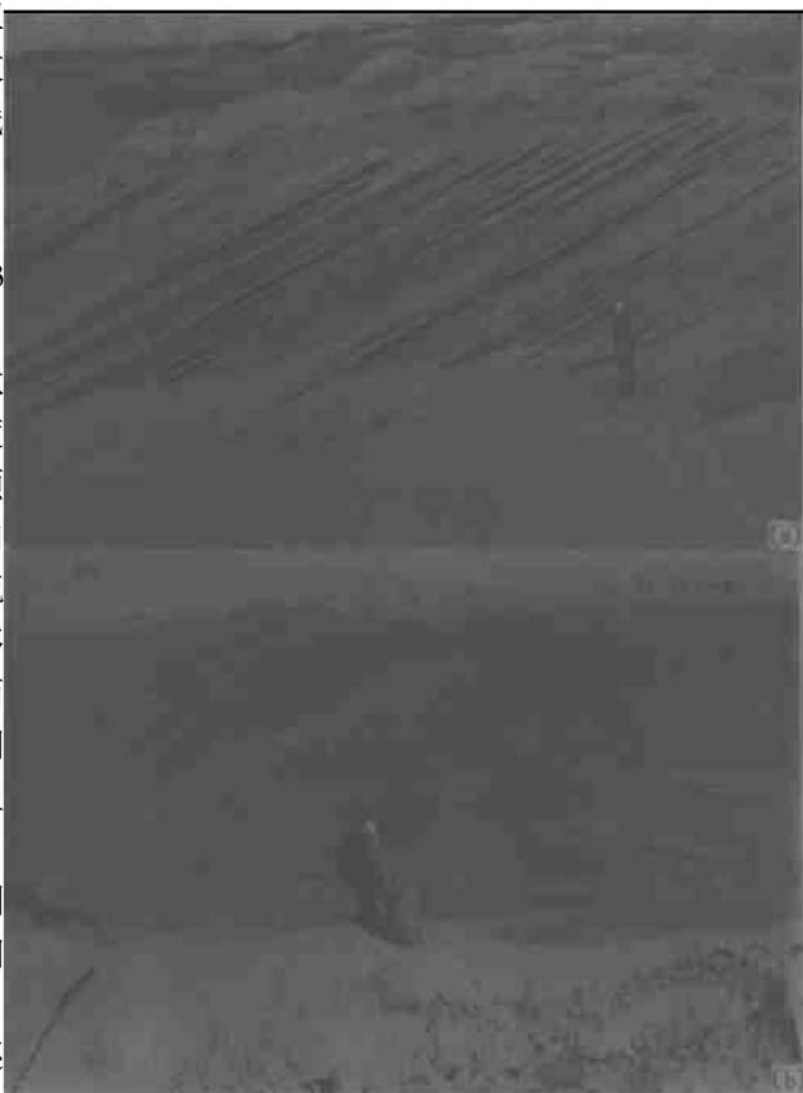


图4 格状沙丘沉积构造

(a) 主梁, (b) 副梁

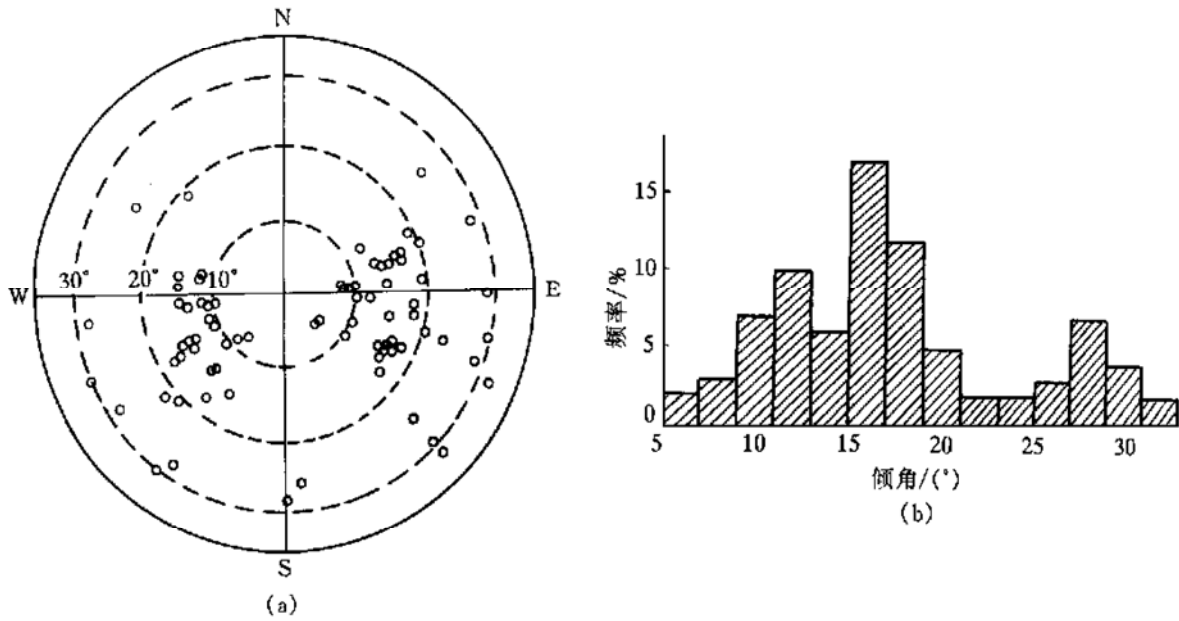


图 5 副梁交错层理产状分布(a)和倾角频率(b)图

交错层理, 倾向 $149^{\circ} \sim 169^{\circ}$, 倾角 $29^{\circ} \sim 31^{\circ}$, 属主梁沉积产物, 因而, 低角度的弧形界面为分割主、副梁沉积的二级界面。

5 讨论

在沙丘形态-动力学分类中, Hunter 等人^[15]以年合成输沙方向与沙丘走向之间的夹角为主要依据, 划分出横向($75^{\circ} \sim 90^{\circ}$)、斜向($75^{\circ} \sim 15^{\circ}$)和纵向($< 15^{\circ}$)等三种基本沙丘类型; Mckee^[16]按沙丘空间组合状况又分出简单、复合和复杂三种沙丘类型。研究区年合成输沙方向与格状主梁垂直, 与副梁具小角度斜交。因此主梁为横向沙丘, 副梁则是纵向沙丘。表现在空间组合上, 副梁叠置于主梁迎风坡, 因而格状沙丘也是一种复杂型横向沙丘。

沙丘表面气流是控制沙丘表面蚀积型式和形态的主要因素。格状沙丘主、副梁在同一区域气流环境中具有不同的表面气流型式, 表明二者各具特征的动力过程和移动机制。主梁处在横向气流条件下, 越过丘顶的气流在背风坡发生分离, 风速剧降使来自迎风坡的沙粒在此处堆积, 并最终形成大型落沙坡和导致沙丘顺主风向或沿合成输沙方向迁移。因而主梁具有横向沙丘的动力学特征^[17]。副梁处在斜向气流条件下, 气流在背风坡附体偏转成与丘脊线一致的纵向气流^[17, 18], 使来自迎风坡的沙粒并没有堆积在背风坡(除坡上部狭长区域外), 而是沿脊线方向输移。由于背风坡风速随原始风入射角的减小而增加, 加之沙粒沿下坡运动时所需起动风速较小^[19], 副梁背风坡也发生侵蚀, 并最终导致副梁的纵向延伸。当然由于存在两个风的交替作用, 副梁脊线也有一定的侧向摆动。斜向风在沙丘两坡均发生侵蚀和沿脊线延伸是阐述纵向沙丘动力过程的关键, 且已在观测与实验中得到证实^[17, 18]。因而副梁具有纵向沙丘的动力学特征。

沙丘表面粒度变化是形态与风力蚀积共同作用的结果。格状沙丘主、副梁表面粒度特征显示出两种不同的分布模式, 也反映出二者具有不同的表面过程和动力学特征。主梁粒度变化是由于: 西北坡处在侵蚀环境中, 风选分异作用使粗颗粒在此处残留且顺风向减少; 东南坡处在堆积环境中, 细颗粒积累和滑落面上重力分异作用使粗而重的颗粒先达坡脚。这反映了

主梁在主风(西北风)作用下迎风坡侵蚀和背风坡堆积的横向沙丘表面过程。副梁粒度变化是因为丘顶在持续的侵蚀作用下粗颗粒相对积累和两坡中下部处在侵蚀环境中使粗颗粒残留且由下而上减少,表明副梁在主风和次主风(东北风)交替作用下,丘脊线侧向摆动和两坡均发生侵蚀等纵向沙丘的表面过程。

沙丘内部构造是记录沙丘沉积和发育过程的直接证据。上述格状沙丘主、副梁外部形状、内部构造和气流动力学之间具有良好的一致性。主梁单倾高角度板状交错层理为主的沉积构造是单向风作用下横向沙丘^[12,17]典型沉积特征。据此,主梁形成于主风(西北风)的作用。副梁双极双峰分布的低-高角度板状-楔状交错层理是纵向沙丘^[9,13,17]所特有的沉积构造。在副梁沉积中,交替出现的再作用面显然是三级界面,其倾角则是两个堆积事件中一次侵蚀程度的表征;低角度爬升波痕纹理和上凹的楔状层理,主要是斜向风在背风坡偏转方向的结果。因此,副梁既在主风(西北风)和次主风(东北风)交替作用下形成,又在双向-偏向风作用下维持其形态。此外,分割主、副梁沉积的二级界面表明副梁是主梁基础上发育的次生沙丘。由此可以认为,格状沙丘是由横向沙丘进入季节性变化的风况环境中并经过一系列形态-气流相互作用而生成。

参 考 文 献

- 1 Cook R, Warren A, Goudie A. Desert Geomorphology. London: UCL Press, 1994. 368~ 396
- 2 吴 正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. 87~ 153
- 3 Cooper W G. Coastal sand dunes of Oregon and Washington. Geol Soc Am Mem, 1958, 72: 1~ 169
- 4 Wilson C. Aeolian bedforms —— Their development and origin. Sedimentology, 1972, 19: 173~ 210
- 5 哈 斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘形态矢量特征及其影响因素. 中国沙漠, 1995, 15: 136~ 142
- 6 Fryberger S G. Dune form and wind regime. In: McKee E D, ed. A Study of Global Sand Seas. US Geol Surv Prof Paper, No 1 052. Washington: US Government Printing Office, 1979. 137~ 170
- 7 哈 斯, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘横向沙丘粒度特征与坡面形态的关系. 中国沙漠, 1996, 16: 215~ 220
- 8 Vincent P J. Particle size variation over a transverse dune in the Nafud as Sirr, Central Saudi Arabia. J Arid Environ, 1984, 7: 329~ 353
- 9 Lancaster N. The Namib Sand Sea. Rotterdam: Balkema, 1989. 47~ 78
- 10 Folk R L. Longitudinal dunes of the northwestern edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia. 1. Geomorphology and grain size relationships. Sedimentology, 1971, 16: 5~ 54
- 11 Lancaster N. Grain size characteristics of linear dunes in the Southwestern Kalahari. J Sediment Petrol, 1986, 55: 395~ 495
- 12 Hunter R E. Basic types of stratification in small aeolian sand dunes. Sedimentology, 1977, 24: 361~ 388
- 13 Tsoar H. Internal structure and surface geometry of longitudinal (seif) dunes. J Sediment, 1982, 52: 823~ 831
- 14 McKee E D, Tibbitts G C. Primary structures of a seif dune and associated deposits in Libya. J Sediment Petrol, 1964, 34: 5~ 17
- 15 Hunter R E, Richmond B M, Alpha T R. Storm controlled oblique dunes of the Oregon coast. Bull Geol Soc Am. 1983. 94: 1 450~ 1 465
- 16 McKee E D. Introduction to A Study of Global Sand Seas. U S Geol Surv Prof Paper, No 1 050. Washington: US Government Printing Office, 1979. 1~ 19
- 17 Pey K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Dunes. London: Unwin Hyman, 1990. 1~ 392
- 18 Tsoar H. Dynamic processes acting on a longitudinal (seif) dunes. Sedimentology, 1983, 30: 567~ 578
- 19 Handisty J, Whitehouse R J S. Evidence for a new sand transport process from experiments on Saharan dunes. Nature, 1988, 332: 532~ 534