

固定沙丘风蚀坑风沙动力学观测研究

孙 禹¹, 杜会石², 哈斯额尔敦¹, 刘美萍¹

(1. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 2. 吉林师范大学生态环境研究所, 吉林 四平 136000)

摘要: 风蚀坑是固定沙丘活化的标志,也是沙漠化的首要环节。本文利用三杯风速仪、风向标及阶梯式集沙仪,对浑善达克沙地南缘固定沙丘风蚀坑的气流及输沙进行了观测。结果表明,气流进入风蚀坑后,经历了扩散减速—辐合加速—分离减速—逐渐恢复的过程。入风方向的微小变化、地形及植被导致风蚀坑气流结构、强度及输沙模式趋于复杂。与轴线平行($< 10^\circ$)的纵向气流使侵蚀坑内减速区西移,风速及输沙率由坑底向两侧壁及积沙区增加;与轴线斜交($\geq 10^\circ$)的气流使减速区东移,气流沿两侧壁向东加速及输沙。积沙区顶部的气流汇集与植被的作用使其加积增高。气流—形态相互作用使风蚀坑加深和纵向延伸并伴随侧向扩展。

关键词: 风蚀坑; 气流; 输沙; 形态发育

DOI: 10.11821/dlxb201609008

1 引言

自20世纪70年代以来,随着实验手段的提高和微气象学有关理论与方法在沙丘地貌研究中的广泛应用,有关沙丘表面气流与输沙的研究,解释了不同形态的沙丘与近地面层气流相互作用及其导致的沙丘发育和移动。大量的野外观测^[1-7]、风洞实验^[8-10]和数值模拟^[11]等已对主要类型沙丘的形态发育和动力过程^[13]有了相当的了解。然而,相对于风积沙丘,目前对风蚀负地貌的研究程度仍然较低。沙丘风蚀坑是由侵蚀坑和坑后积沙区(或沙丘)两个地貌单元组成的风沙地貌形态,广泛分布于沙质海岸、湖岸、干旱和半干旱沙质草原及固定半固定沙丘的迎风坡,是固定沙地或沙丘活化的明显标志^[14]。地形与气流之间的相互作用,以及由输沙过程导致的蚀积格局控制着风蚀坑的演变。20世纪末,对于风蚀坑气流动力学的研究主要集中于海岸沙丘风蚀坑。由于观测仪器条件的限制,风速风向未能达到同步观测。进入21世纪,在美国、加拿大、爱尔兰和中国呼伦贝尔沙质草原等地,对风蚀坑气流^[15-24]、形态^[25]及演化过程^[26-27]开展了一系列较为详细的观测。虽然解释了侵蚀坑形态与气流之间的相互作用,但只有少数研究^[28-29]关注了气流与输沙之间的关系。

本文在浑善达克沙地南缘,对发育在固定沙丘迎风坡的风蚀坑进行了气流及输沙观测,目的在于探讨风沙坑内的气流变化与输沙之间的关系,以及输沙变化对于风蚀坑形态发育的影响。

收稿日期: 2016-04-21; 修订日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671002, 41401002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671002, No.41401002]

作者简介: 孙禹(1987-), 男, 吉林长春人, 博士生, 主要从事干旱区地貌与环境研究。E-mail: sunyu0611208@126.com

通讯作者: 哈斯额尔敦(1964-), 男, 内蒙古科左中旗人, 博士, 教授, 主要从事干旱区地貌与环境研究。

E-mail: hasi@bnu.edu.cn

2 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林郭勒盟南部, 坐标为 $116^{\circ}00'20''\text{E}\sim 116^{\circ}00'58''\text{E}$, $42^{\circ}12'13''\text{N}\sim 42^{\circ}12'36''\text{N}$ (图1), 是燕山北缘的低山丘陵与大兴安岭南缘低山丘陵交汇地带, 平均海拔高度 1300 m。该区属中温带半干旱大陆性季风气候, 冬季寒冷漫长; 春季多风少雨; 夏季温热, 降水集中; 秋季短促, 降水锐减, 气温下降, 风速加大。年平均气温 2.1°C , 最低温度 -17.6°C , 最高温度 18.6°C ; 全年降水量为 387.4 mm, 6-9月降水量占全年降水的 67.5%; 全年蒸发量为 1714.3 mm, 是全年降水量的 4~5 倍。该区主要以西北风为主, 年平均风速为 3.5 m s^{-1} (图2)。地带性土壤主要为黑钙土、暗栗钙土; 非地带性土壤主要为风沙土, 其次为沼泽土及草甸土; 主要植被为羊草 (*Aneurolepidium chinense*)、贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*)、冰草 (*Agropgrron cristatum*) 等。

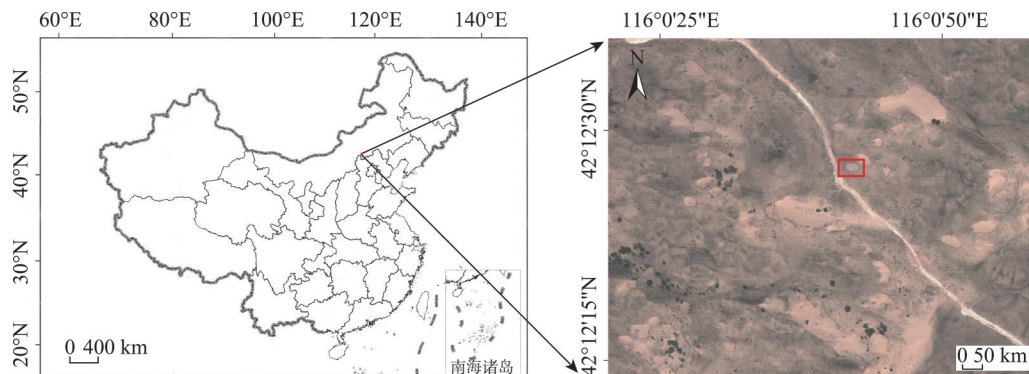


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study site

沙丘主要分布在该区南部及东南部, 风蚀坑普遍发育在沙丘的西坡及西南坡。由于发育部位地形条件的差异, 风蚀坑规模及走向各异。其中侵蚀坑长度介于 20~40 m 的约占 56%; 侵蚀坑长轴为 W-E 走向的约占 27%, 其次为 WNW-ESE 走向, 占 20%。积沙区走向基本与侵蚀坑走向一致, 分布于侵蚀坑下风向或延伸至沙丘背风坡。

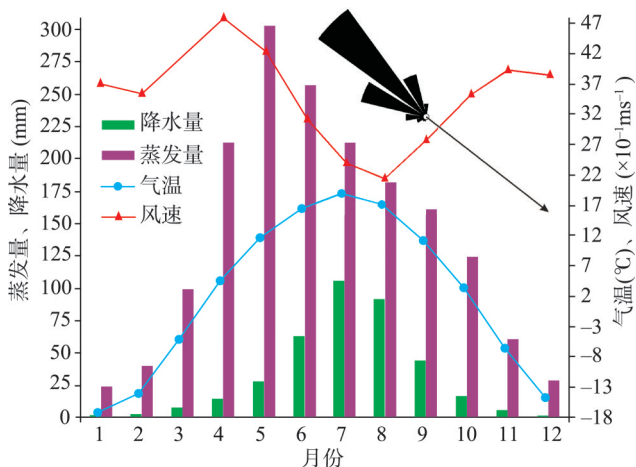


图2 研究区气候特征

Fig. 2 Climate characteristics of the study area

3 方法

观测风蚀坑位于正蓝旗东南部 (坐标为 $116^{\circ}0'41.64''\text{E}$, $42^{\circ}12'27.43''\text{N}$), 平面形态大致呈椭圆形, 长轴走向为 WNW-ESE ($282^{\circ}\sim 102^{\circ}$), 侵蚀坑长 30.73 m, 宽 20.74 m, 深 2.37 m; 积沙区长 25.44 m, 宽 23.84 m, 高 1.44 m, 走向与侵蚀坑一致。侵蚀坑西缘较窄, 为气流的入风段, 坡度比较平缓 (约 0.5°), 南、北两侧壁均为上陡下缓的凹形坡面, 北侧壁较陡, 坡度分别为 $11^{\circ}\sim$

21° (南侧壁) 和 20°~30° (北侧壁), 侵蚀坑东坡发育陡坎, 坡度较陡 (约 35°), 坡长 7.2 m。坑后积沙区发育较小规模沙丘, 迎风坡短而陡, 背风坡长而缓, 北部要略高于南部, 丘顶浑圆。积沙区被密集植被覆盖, 平均植被盖度约为 40%, 以赖草 (*Leymus Hochs*) 为主。

3.1 气流观测

观测仪器为已校准的 EC 9-1 型三杯风速仪, 与 Campbell 公司生产的 CR 1000 数据采集仪相连, 该系统可每 5s 自动采集及储存观测数据。共布设 18 个点位观测风蚀坑的近地表流场 (图 3a, L1~L18), 其中侵蚀坑 12 个, 积沙区 6 个。在各观测点距地面 0.3 m 处架设风杯, 并在同一高度设置飘带, 根据飘带指示的方向, 用罗盘测定气流的风向。由于在丘顶 (L16) 架设了风向标, 所以在 0.3 m 处系飘带的同时, 将风向标高度调整到 0.5 m。另外, 在风蚀坑西缘 5 m 处设立参考站, 以观测距地面 0.2 m、0.3 m、0.6 m、1.0 m、1.2 m、1.5 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m 处的风速和距地面 4.0 m 处的风向。本文将测得的风速数据按照 1 min 间隔取平均值后进行分析。

相对加速率能够度量风速在风蚀坑内各部位的变化情况, 是评价气流变化的重要指标, 本文采用 Jackson 等^[30]定义的公式:

$$\Delta S = \frac{u_z - U_z}{U_z} \quad (1)$$

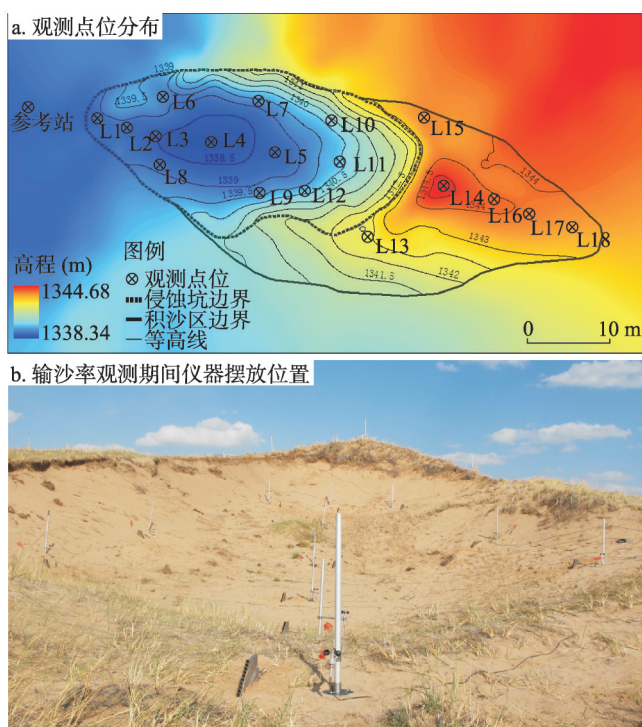
式中: ΔS 为相对加速率; u_z 为 z 高度 (0.3 m) 处的实测风速 (m s^{-1}); U_z 为参考站同一高度处的实测风速 (m s^{-1})。

3.2 输沙率观测

用阶梯式集沙仪观测风蚀坑距地表 0.2 m 高度内的输沙量。共布设 14 个观测点 (图 3a, L1~L12、L14、L17), 其中侵蚀坑 12 个, 积沙区 2 个。输沙量观测与水平流场测量同步进行。根据风向风速稳定性和地面起沙等情况, 以 5~10 min 为间隔共进行 3 次集沙, 采集的沙粒样品经风干处理后用千分之一电子天平 (精度 0.001 g) 称重记录, 并以观测高度 (0~0.2 m) 内单位时间单位宽度的总输沙量表示输沙率 ($\text{mg min}^{-1} \text{cm}^{-1}$)。

4 结果与分析

气流观测期间, 参考站距地面 4 m 高处的风向风速变化 (图 4)。观测期间, 风况较



注: 利用 RTK-GP 对风蚀坑及其周围环境的高程进行实地测量, 借助 ArcGIS 的空间分析功能, 用色阶表示高程的差异; 等高距为 0.5 m

图 3 观测点位分布图

Fig. 3 Configuration of the measurement sites

为稳定, 风速均大于 6 m s^{-1} , 多数集中于 $8 \sim 10 \text{ m s}^{-1}$; 风向变化于 $W \sim WNW$ ($265^\circ \sim 305^\circ$) 之间, 且绝大多数来自 WNW ($281.25^\circ \sim 303.75^\circ$)。

4.1 水平流场

4.1.1 风向变化 将各点所测风向结果绘制成图 (图4), 4次观测中气流进入风蚀坑的合成风向分别为 279° 、 294° 、 292° 、 286° , 与侵蚀坑纵轴夹角分别为 3° 、 12° 、 10° 、 4° 。气流从入风口进入侵蚀坑, 在侵蚀坑背风坡脚处 (L3、L4) 发生了水平方向上分离, 气流沿着两个侧壁及侵蚀坑底部向下风向扩散。其中, 沿中轴流动的气流以基本平行于轴线的方向流向积沙区; 沿南侧壁流动的气流分别在南侧壁中部及侵蚀坑东南侧缺口溢出。沿北侧壁流动的气流出现两种情况: 在观测1和观测4期间, 气流越过北侧壁向外溢出; 在观测2及观测3期间, 气流沿北侧壁向东流动, 并从东北侧溢出。

积沙区中, 气流从侵蚀坑东缘溢出后由坑缘向顶部汇聚, 越过丘顶的气流在背风坡中上部 (L16) 发生分离而形成反向气流。而且, 由该点风向标 (0.5 m) 和飘带 (0.3 m) 所指示的方向 (图5), 在观测1和观测4中二者相反; 在观测2和观测3中一致。背风坡

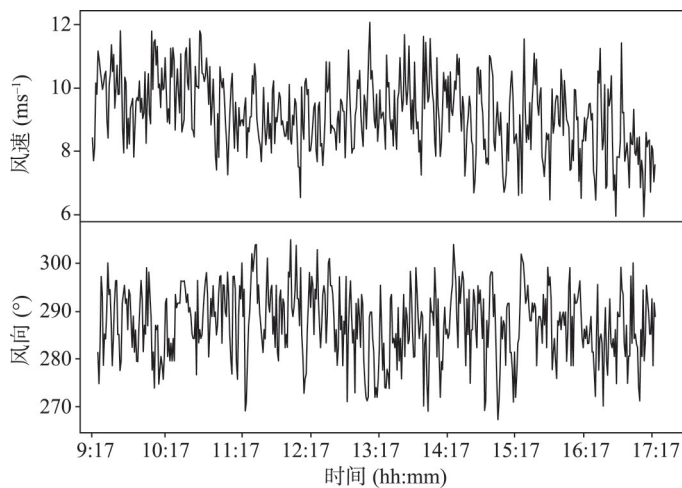
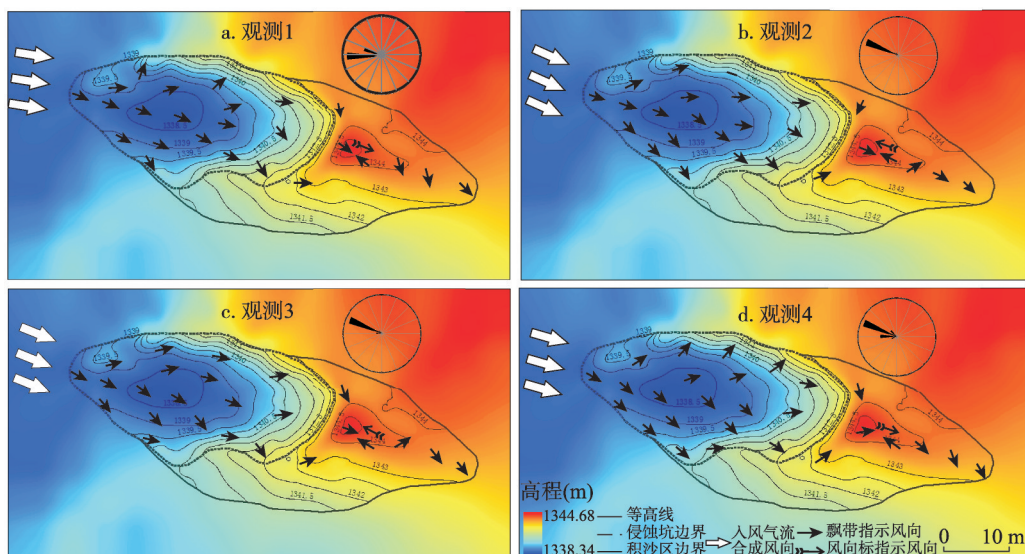


图4 气流观测期间参考站(4.0 m)风况

Fig. 4 Wind conditions during airflow observations measured at the top of the reference tower ($z = 4.0 \text{ m}$)



注: 白色箭头表示入风气流的合成风向; 风向玫瑰图为各观测期间入风气流的分布情况, 长度表示各风向的频率。等高距为 0.5 m 。

图5 风蚀坑内气流方向变化

Fig. 5 Wind directions within the blowout

中部的风向在观测1和观测4中为NW,在观测2和观测3中为SW。背风坡下部及坡脚风向均以NW为主。

4.1.2 风速变化 图6是风速加速率沿风蚀坑各纵断面的分布。在与风向同步的4次观测中,参考点0.3 m高处风速分别是 5.6 m s^{-1} 、 6.3 m s^{-1} 、 5.1 m s^{-1} 和 4.0 m s^{-1} 。在纵轴线上(图6a),气流到达侵蚀坑西缘(L1)时风速增加46%~60%,进入风蚀坑后向坑底(L4)减小,之后又向侵蚀坑东缘(L11)逐渐增加;在积沙区,由坑缘至积沙区顶(L14)剧增至最高值,到背风坡上部(L16)锐减,之后逐渐增加。侵蚀坑西缘(L1)及积沙区背风坡上部(L16)的风速加速率,在观测1及观测4中风速高于观测2和观测3;侵蚀坑内的最低风速加速率,在观测1和观测4中出现在西坡坡脚(L3),而在观测2及观测3中出现在侵蚀坑底部(L4)。

沿侵蚀坑北、南两侧壁(图6b、6c),风速加速率均由西向东增加,但到积沙区出现两种情况:在观测1和观测4中,北侧(L15)减小,南侧(L13)增加;在观测2和观测3中,北侧(L15)增加,南侧(L13)减小。此外,在侵蚀坑东南角(L12),风速加速率在观测1和观测4的值低于观测2和观测3的值(图6b、6c)。

4.2 输沙率

图7是沿风蚀坑纵轴线和侵蚀坑3个横断面的输沙率及相应风速(集沙期间的平均风速)变化。在3次观测之间,各断面的风速变化模式相对固定,但输沙率变化出现较大的差异。沿纵轴方向(图7a、7e、7i),输沙率变化与风速变化不一致,甚至出现相反情况,如侵蚀坑内的输沙率普遍大于积沙区,输沙率最高值出现在风速最低的坑底(L4),输沙率最低值出现在风速最高的积沙区顶(L14)。

在横断面(图7b~7d、图7f~7g、图7j~7m),输沙率与风速变化趋势基本一致。而且,除断面1的第2次观测(图7f)之外,南、北两侧各点的输沙率均高于对应纵轴线点的输沙率;在断面1和断面2,前两次观测中南侧壁(L8和L9)的输沙率高于对应的北侧壁(L6和L7);在横断面3,三次观测中南侧壁(L10)输沙率低于北侧壁(L11)。

此外,各观测期间横断面的结果(图7b~7d、图7f~7g、图7j~7m)还表明,气流分别沿南北侧壁自西向东加速,这与水平流场观测期间的结论一致。北侧壁的输沙率同样表现出由西向东增加的趋势,而南侧壁的输沙率由西向东表现出先增加再减小的趋势。

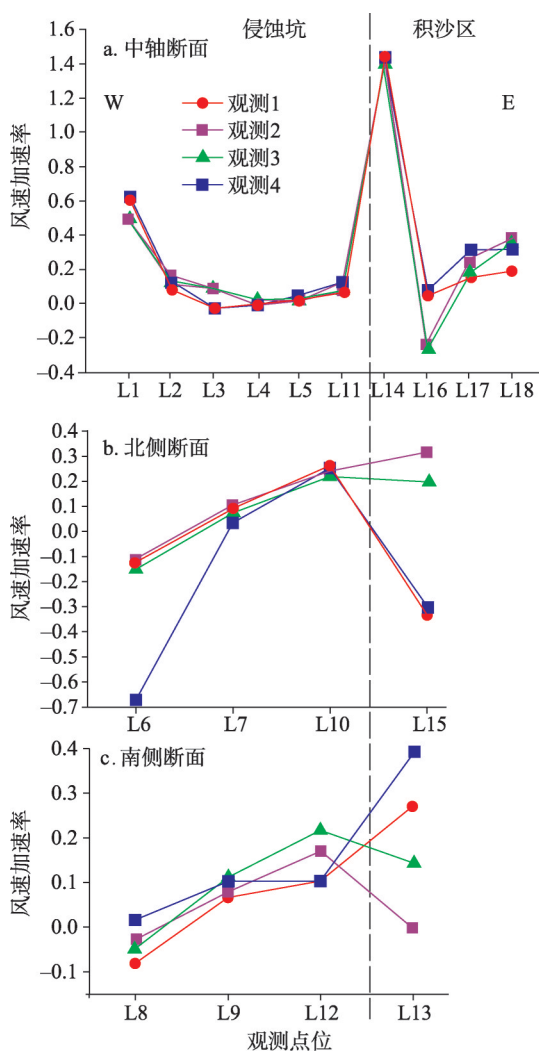


图6 近地表(0.3 m)纵断面风速观测结果
Fig. 6 Fractional speed-up ratio along the longitudinal profiles ($z = 0.3 \text{ m}$)

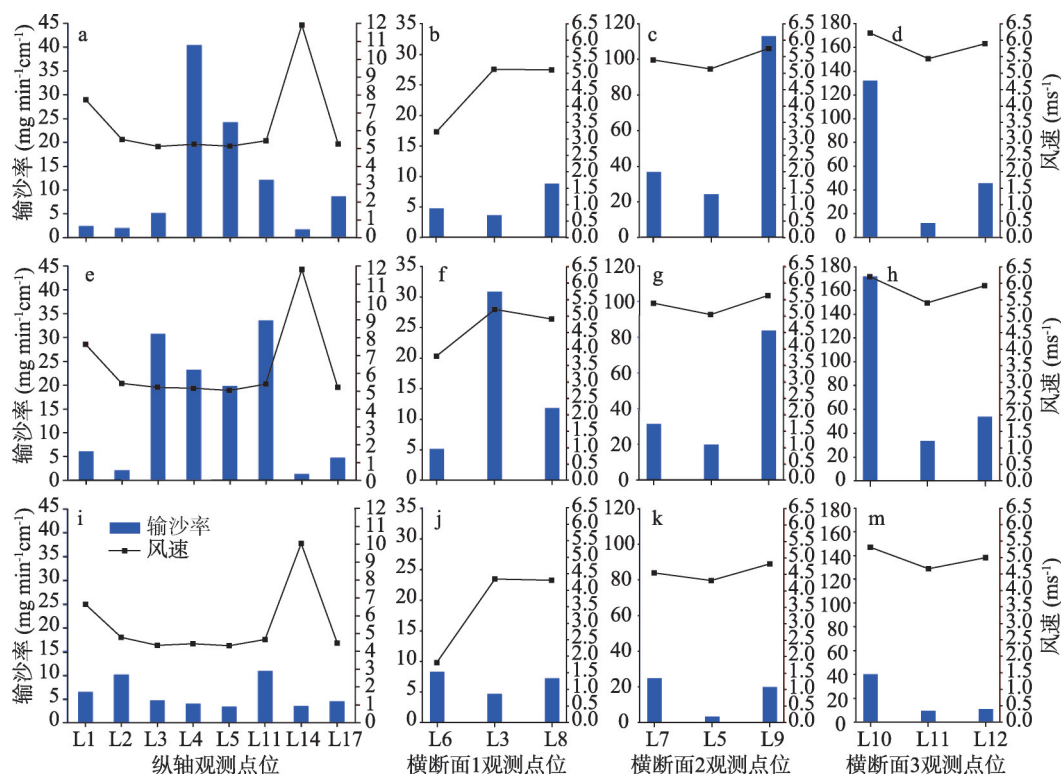


图7 各断面单宽输沙率与风速对比(a~d 第1次观测; e~h 第2次观测; i~m 第3次观测)

Fig. 7 Sand transport rate and simultaneous time-averaged wind speed (a-d for run 1; e-h for run 2; i-m for run 3)

5 讨论

观测结果显示, 不同方向风与地形之间的相互作用导致风蚀坑气流结构发生明显的变化。风向与风蚀坑轴线之间的夹角, 以及侵蚀坑内各坡面相对于风向的性质和坡度等决定着坑内气流性质。沙丘背风测气流实验研究表明^[3, 31], 风向与沙丘走向小角度斜交时在较陡 ($> 20^\circ$) 背风坡发生偏转成为沿走向的次生气流, 但在坡度小 ($< 20^\circ$) 的背风坡保持原来的方向。由图5, 对于偏西风而言, 侵蚀坑入风口处的西坡始终是背风坡, 但因坡度较缓, 进入坑内的气流在西坡成为附着未偏向流, 因此侵蚀坑纵轴线上气流始终与走向一致。侵蚀坑内其余地形对不同方向风而言其性质明显不同。在观测1和观测4中, 风向与纵轴线几乎平行, 此时, 侵蚀坑南侧壁西半段 (坡向东北) 成为背风坡, 由于坑缘线与风向之间小角度斜交, 进入侵蚀坑的气流偏转为沿南侧壁的次生气流; 北侧壁东半段 (坡向西南) 成为迎风坡, 进入侵蚀坑的部分气流在此坡直接向上爬升溢出。在观测2和观测3中, 风向与纵轴线走向之间左偏 10° 左右, 与北侧壁走向成小角度斜交, 进入侵蚀坑的气流在背风坡偏转为沿北侧壁的次生气流; 与侵蚀坑南侧壁走向平行, 气流直接沿南侧壁走向运动。

气流方向与地形之间的相对关系影响风蚀坑风速分布。研究表明^[4, 32], 风的人射角和坡面形态决定风的加速或减速。研究风蚀坑发育在固定沙丘西南坡顶部附近, 气流达到侵蚀坑西缘时气流加速, 而且风速加速率与风的人射角成反比 (图6a)。在纵轴线, 近地表风速变化曲线与地形变化趋势一致。气流进入侵蚀坑后发生扩散而减速, 减速区范围

随入风角增加而东移。气流在积沙区迎风坡的爬升过程中, 由于地形的迅速抬升, 使得气流被压缩而加速, 直至积沙区顶部风速达到最大; 越过丘顶, 受植被的影响^[33-35]气流在背风坡发生分离形成水平轴的涡流, 导致背风坡上部风速剧降至最低值, 之后顺风向逐渐恢复。气流沿侵蚀坑南北侧壁向东加速 (图 6b、6c), 这与 Hugenholtz 等^[25]的观测结果一致。但是, 到达积沙区丘顶南北两侧 (L13 和 L15) 时, 南、北侧壁作为背风坡时气流加速, 而作为迎风坡时则减速。

研究风蚀坑发育在内陆固定沙丘, 积沙区沉积物主要来自于侵蚀坑内部, 因此输沙率对植被、气流及地形等因素的响应更加敏感^[28]。由图 7, 风速变化与输沙率沿中轴的变化趋势一致性较差, 其中积沙区顶部植被的影响导致输沙率降低, 至于侵蚀坑底部的相对高输沙率, 目前还无法解释。在横断面, 风速及输沙率变化模式保持一致, 且风速加速区 (横断面 2 和横断面 3) 两侧输沙率高于相应轴向输沙率反映了风蚀坑底部的侵蚀。南北两个侧壁输沙率沿程增加, 也反映了偏转气流向东输送沙物质至积沙区。其中, 侵蚀坑东北侧壁 (L10) 的风速及输沙率均高于东南侧壁 (L12), 说明与南坡相比, 北坡向积沙区提供了更多的沉积物。这可能是造成积沙区北部略高于南部的原因, 也将导致侵蚀坑两侧壁的不等速扩张。

6 结论

(1) 气流进入风蚀坑后, 向坑底扩散减速, 向积沙区顶辐合加速, 在积沙区背风坡分离减速, 以及向下风向逐渐恢复。

(2) 区域风向的微小变化导致风蚀坑气流模式发生较大的变化。入风方向与轴向一致 ($< 10^\circ$) 时, 减速区西移, 气流沿南侧壁向东加速, 在北侧壁向外溢出, 积沙区北侧风速小于南侧; 入风方向与轴向斜交 ($\geq 10^\circ$) 时, 减速区东移, 气流沿南、北侧壁向东加速, 积沙区北侧风速大于南侧。

(3) 气流方向、地形和植被影响风蚀坑输沙率, 进而控制风蚀坑蚀积格局。积沙区沙物质全部来自侵蚀坑, 植被对风沙流的拦截作用使积沙区顶加积增高。纵向气流加深侵蚀坑, 斜交气流清理两侧壁松散沙物质, 进而使风蚀坑加深和纵向延伸并伴随侧向扩展。

参考文献(References)

- [1] McKenna Neuman C, Lancaster N, Nickling W G. The effect of unsteady winds on sediment transport on the stoss slope of a transverse dune, Silver Peak, NV, USA. *Sedimentology*, 2000, 47: 211-226.
- [2] Wang Xunming, Dong Zhibao, Zhao Aiguo. Airflow and particle-size distributions and their significance on the dynamic process of a simple transverse dune. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(4): 573-576. [王训明, 董治宝, 赵爱国. 简单横向沙丘表面物质组成、气流分布及其在动力学过程中的意义. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(4): 29-32.]
- [3] Hasi, Wang Guiyong. Variation in dune lee-side airflow and its significance. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(6): 573-576. [哈斯, 王贵勇. 沙丘背风侧气流的变化特征及其意义. *地理科学*, 2000, 20(6): 573-576.]
- [4] Hasi, Dong Guangrong, Wang Guiyong. Near-surface airflow and slope morphology of dunes in southeastern Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(1): 1-4. [哈斯, 董光荣, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面气流与坡面形态的关系. *中国沙漠*, 1999, 19(1): 1-4.]
- [5] Zhao Jingfeng, Li Chongshun, Zhou Xingjia, et al. Study on the fluid field and deflation characteristics on barchanic dune surface. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(3): 18-24. [赵景峰, 李崇舜, 周兴佳, 等. 新月形沙丘丘表流场与沙丘蚀积特征. *中国沙漠*, 1993, 13(3): 18-24.]

- [6] Butterfield G R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport: High-resolution measurements in a wind tunnel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 393-412.
- [7] Walker I J. Secondary airflow and sediment transport in the lee of a reversing dune. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 437-448.
- [8] Tseo G. Two types of longitudinal dune fields and possible mechanisms for their development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1993, 18: 627-643.
- [9] Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. Wind tunnel simulation on flow reattachment on lee of transverse dunes. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 16-20. [钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 横向沙丘背风侧气流重附风洞模拟. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 16-20.]
- [10] Qian Guangqiang, Dong Zhibao, Luo Wanyin, et al. A wind tunnel simulation on mean flow variances over transverse dunes. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(1): 10-17. [钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 横向沙丘气流平均速度变化规律的风洞模拟. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 10-17.]
- [11] Frank A, Kocurek G. Towards a model of airflow on the leeside of aeolian dunes. *Sedimentology*, 1996, 43: 451-458.
- [12] Stam J M T. On the modelling of two-dimensional aeolian dunes. *Sedimentology*, 1997, 44(1): 127-141.
- [13] Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen, 1941: 265.
- [14] Zhu Zhenda, Liu Nu, Di Xingmin. *Desertification and Its Governance in China*. Beijing: Science Press, 1989: 1-98. [朱震达, 刘恕, 邸醒民. *中国沙漠化及治理*. 北京: 科学出版社, 1989: 1-98.]
- [15] Wang Shuai, Hasi Eerdun, Zhang Jun, et al. Geomorphological significance of air flow over saucer blowout of the Hulun Buir Sandy Grassland. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(5): 745-749. [王帅, 哈斯, 张军, 等. 呼伦贝尔沙质草原碟形风蚀坑表面气流及其意义. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 745-749.]
- [16] Wang Shuai, Hasi Eerdun. Air flow dynamics of the blowout trough in the Hulun Buir sandy grassland. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2): 80-85. [王帅, 哈斯. 呼伦贝尔沙质草原槽形风蚀坑表面气流特征. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 80-85.]
- [17] Li Shuangquan, Zhang Ping, Hasi Eerdun, et al. Interaction between airflow and shape of saucer blowout in grassland. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(5): 1201-1209. [李双权, 张萍, 哈斯, 等. 沙质草地碟形风蚀坑形态: 气流相互作用. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1201-1209.]
- [18] Smyth T A G, Jackson D W T, Cooper J A G. High resolution measured and modelled three-dimensional airflow over a coastal bowl blowout. *Geomorphology*, 2012(177/178): 62-73.
- [19] Hesp P A, Walker I J. Three-dimensional aeolian dynamics within a bowl blowout during offshore winds: Greenwich Dunes, Prince Edward Island, Canada. *Aeolian Research*, 2012, 3(4): 389-399.
- [20] Smyth T A G, Jackson D W T, Cooper J A G. Three dimensional airflow patterns within a coastal trough-bowl blowout during fresh breeze to hurricane force winds. *Aeolian Research*, 2013, 9: 111-123.
- [21] Smyth T A G, Jackson D W T, Cooper J A G. Computational fluid dynamic modelling of three-dimensional airflow over dune blowouts. *Journal of Coastal Research*, 2011, 102(8): 314-318.
- [22] Garès P A, Pease P. Influence of topography on wind speed over a coastal dune and blowout system at Jockey's Ridge, NC, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(7): 853-863.
- [23] Pease P, Gares P. The influence of topography and approach angles on local deflections of airflow within a coastal blowout. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(10): 1160-1169.
- [24] Hugenholtz C H, Wolfe S A. Form-flow interactions of an aeolian saucer blowout. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 919-928.
- [25] Hugenholtz C H, Wolfe S A. Morphodynamics and climate controls of two aeolian blowouts on the northern Great Plains, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(12): 1540-1557.
- [26] Abhar K C, Walker I J, Hesp P A, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian blowout dunes at Cape Cod. *Geomorphology*, 2015, 236: 148-162.
- [27] Barchyn T E, Hugenholtz C H. Reactivation of supply-limited dune fields from blowouts: A conceptual framework for state characterization. *Geomorphology*, 2013, 201: 172-182.
- [28] Bauer B O, Davidson-Arnott R G D, Walker I J, et al. Wind direction and complex sediment transport response across a beach-dune system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(15): 1661-1677.
- [29] Smyth T A G, Jackson D, Cooper A. Airflow and aeolian sediment transport patterns within a coastal trough blowout during lateral wind conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(14): 1847-1854.

- [30] Jackson P S, Hunt J C R. Turbulent wind flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, 101: 929-955.
- [31] Sweet M L, Kocurek G. An empirical model of aeolian dune lee-face airflow. *Sedimentology*, 1990, 37: 1023-1038.
- [32] Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes*. London: Routledge Press, 1995.
- [33] Schwendiman J L. Coastal sand dune stabilization in the Pacific Northwest. *International Journal of Biometeorology*, 1977, 21(3): 281-289.
- [34] Jungerius P D, Witter J V, van Boxel J H. The effects of changing wind regimes on the development of blowouts in the coastal dunes of The Netherlands. *Landscape Ecology*, 1991, 6(1/2): 41-48.
- [35] Gares P A, Nordstrom K F. A cyclic model of foredune blowout evolution for a leeward coast: Island Beach, New Jersey. *Annals of the Association of American Geographers*, 1995, 85(1): 1-20.

Aeolian dynamical process of blowout on the fixed dune

SUN Yu¹, DU Huishi², HASI Eerdun¹, LIU Meiping¹

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Institute of Ecological Environment, Jilin Normal University, Siping 136000, Jilin, China)

Abstract: Blowouts are the precursors to dune reactivation, which is the primary manifestation of desertification. Masts of three-cup anemometers, wind vanes, and sand traps were used to measure wind flows and sediment transport rates through a blowout developed on the fixed dune, which is located on the southern fringe of the Otingdag Sandy Land. Results demonstrate that after entering the blowout, airflow expanded and decelerated, reattached and accelerated, separated and suddenly decelerated, and gradually accelerated. The angle of incidence between the approaching wind and the blowout long-axis, local topography and vegetation significantly affected the airflow patterns and sediment transport rates. When winds approached from directions within 10° of the blowout axis, the deceleration zone moved westwards, airflow accelerated from the bottom of the blowout to the erosional walls and the depositional lobe; when the approach angles became oblique and equal or greater than 10° of the axis, the deceleration zone expanded eastwards, airflow accelerated and transported sediments to the east. Airflow reattachment and highly dense vegetation on the top of the depositional lobe captured and deposited considerable sediments, contributing to the increment of the height of the depositional lobe. The flow-form interactions within the study site gave rise to the deepening, elongating and widening of the blowout.

Keywords: blowout; wind flow; sediment transport; topographic development