沙质草原槽形风蚀坑形态动力学研究

王 帅[1,2]，哈 斯[2]

（1. 浙江省水利河口研究院，杭州 310020；
2. 北京师范大学资源学院，环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875）

摘要：对呼伦贝尔沙质草原地区槽形风蚀坑表面气流的观测结果显示：当气流进入风蚀坑，速度明显降低，在坑内的前 1/2 距离，风速较低，然后逐渐加速，在坑长 3/4 处，速度达到最高，但在坑后积沙坡脚处，由于气流遇阻且辐散的原因，速度再次降低，出现停滞现象，直至积沙坡顶才逐渐恢复。风蚀坑侧壁是由气流被吸入的过程侵蚀的，气流在坑内聚集加速从而侵蚀坑底。当斜向经过风蚀坑时，气流一般是从风向方的侧壁被吸入风蚀坑，由于侧壁坡度较陡，气流在进入过程中形成分离流，到达对面侧壁后形成反向回流造成进入侧的侧壁被侵蚀，而对面侧壁上有沙物质沉积的现象。气流在坑内前部形成螺旋流，在坑底后部形成高速流，积沙坡脚减速后又逐步恢复溢出风蚀坑。

关键词：自然地理学；呼伦贝尔沙质草原；槽形风蚀坑；表面气流
中图分类号：P931.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-2850(2008)11-1455-5

Morphology dynamics of trough blowout in sandy grassland

WANG Shuai[1,2], HASI Eerdun[2]

(1. *Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou* 310020, *China*;
2. *College of Resources Science and Technology; Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster, the Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: Blowouts are the best surface expressions of the aeolian processes responding to regional climatic changes and human activities, it is also the driving force of grassland landscape heterogeneity. When the wind approaches the trough blowout parallel to the throat orientation, the velocity becomes slow because of the expansion, and until jet usually occurs in the 3/4 of the central line of the deflation basin, this is the result of the fact that more and more flow is sucked into the blowout, and the rim of the blowout is usually eroded by this process, therefore flow deceleration and expansion occurs upon the depositional lobe, and the previous condition reoccurs on the crest. When the wind approaches the blowout obliquely, the flow is usually extremely turbulent and large spiral vortices are commonly seen, flow is sucked into the blowout from the sidewall where wind enters, because the erosional wall is very steep, so the flow becomes return flow to erode the entering side wall and make the sands sedimented on the opposite wall. Trough blowout morphologies are explained as a function of these flow patterns.

Key words: physical geography; Hulun Buir sandy grassland; trough blowout; surface airflow

0 引言

风蚀坑（blowout）通常指植被覆盖的固定沙丘或者平坦草地受风吹蚀而形成的凹地、槽和洼地，属于沙漠和沙漠化地区常见的一种风蚀地貌类型[1]。按风蚀坑的几何形状，一般将风蚀坑分为碟形坑和槽形坑两大类，前者具有宽平的坑底，呈浅碟形椭圆状，深度较浅；后者则具有较深的长廊道，呈狭长形扩展[2~3]。近 10 年中，FRASER 等[4]在密西根湖南岸对风蚀坑内的气流进行了观

基金项目：国家自然科学基金（40471013）
作者简介：王帅（1982—），男，硕士，主要研究方向：水土资源保护及荒漠化过程与防治. E-mail: shuaiwang@ires.cn

测，发现气流进入风蚀坑后辐散并形成螺旋流，在坑后积沙坡前停滞后在坡顶加速。HESP[5]在澳大利亚海岸地区对槽形坑内气流进行了首次定量观测，并利用概括模型显示气流在坑内形成急流且呈螺旋状前进。但沙质草原地区风蚀坑表面气流及其地貌学意义至今没有系统观测和分析，本文根据对呼伦贝尔沙质草原槽形风蚀坑表面二次流的观测结果，分析了其地貌学意义，探讨了这种灾害性地貌的发育过程。

1 方法

选取一个大型槽状风蚀坑进行研究（如图 1 所示），走向西北东南向（约 310°～130°），长约 130 m，宽 25 m，深 8 m. 西北入风口处沉积物和崩落物混杂，坡度较陡（18°～21°），东南出风口积沙坡长而缓（4°～6°），东北坡和西南坡坡度较陡（都约 24°～26°），但东北坡侵蚀强烈，出露河流相沉积物并有崩塌现象，西南坡有大量沙物质沉积且有沙粒滑落到坡脚，坑底出露地下水，不可再侵蚀。

沿风蚀坑的纵轴线（与走向一致）在入风口坡中、坡脚、坑底、坑后缘、积沙坡顶和积沙区等地共设 7 个观测点（L1～L7），每个观测点同时观测 10，30，60，100，150，200，400 cm 等 7 个高度的 1 min 平均风速。并分别在坑长的 1/4、1/2 和 3/4 三个横截面上（H1～H3）设立观测点，每个截面包括 3 个或 5 个点，每个点也做同样的观测。另外，在风蚀坑上风向的草地上设一固定观测点（参考点）进行同步观测，7 个风速观测高度的设置与坑内风速观测高度相同。同时利用阶梯式积沙仪在各部位进行观测（如图 2 所示）。

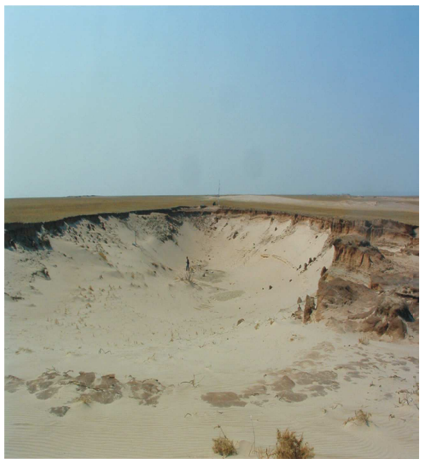


图 1 研究风蚀坑
Fig. 1 The photo of the studied blowout

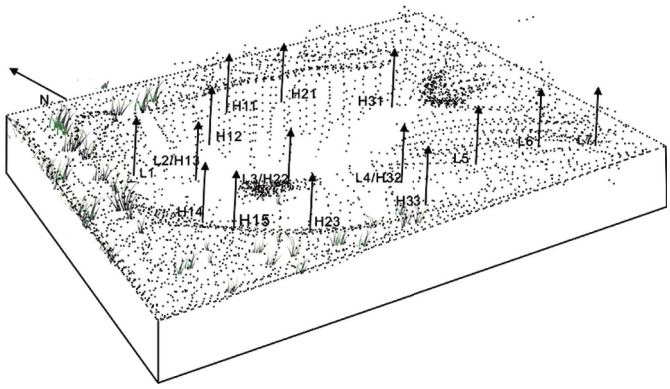


图 2 研究风蚀坑示意图
Fig. 2 The schematic diagram of the studied blowout

2 结果与分析

当风向和风蚀坑的延伸方向一致（约 320°～120°），即平行进入风蚀坑时的表面气流特征如下：

如图 3 所示，气流进入风蚀坑，速度显著降低，在坑长 1/4 处，近地表 10 cm 高度和 4 m 高度的风速都降至参考点风速的 75%，但风速廓线基本符合对数规律（如图 4 所示），拟合相关系数达 0.95，然后风速逐渐升高，在坑长 1/2 处出坑底，风速已基本恢复到参考点水平，但随高度不符合对数关系，在 3/4 坑底处，速度达到最大，10 cm 高度风速达到参考点的 1.45 倍，在积沙坡脚处，气流再次减速，各高度风速差异变得不明显，也就是 FRASER 观测到的停滞现象，在坑后积沙坡顶部，风速再次恢复到接近参考点水平，在顶后的沙地上，近地表风速略有降低，而 3 m 和 4 m 高度的风速略有增加。

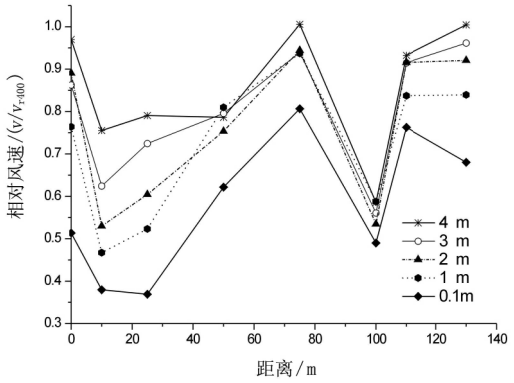


图 3 风蚀坑纵轴线各点相对风速折线图
Fig. 3 The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the central line of the blowout

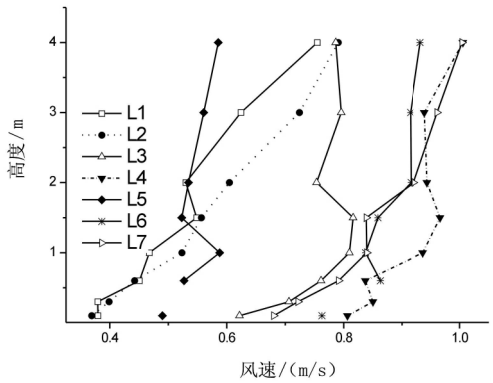


图 4 风蚀坑纵轴线各点实测风速廓线图
Fig. 4 The wind speed profiles along the central line of the blowout

在坑长 1/4 处的横截面上，共设置了 5 个观测点，即坑底加西南坡的坡中和坡脚，东北坡的坡中和坡脚，各点的风速在不同高度呈现明显不同的趋势：在 2 m 高度，坑底风速最高，两侧坡脚、坡上依次降低，西南坡略高于东北坡；而在以上高度，坡上的风速要大于坡脚风速，西南坡上最大；在近地表，两侧坡上风速最小，其次是坑底，坡脚风速较高，且西南坡略高于东北坡（如图 5 所示）。

在坑长 1/2 处的横截面上，共设了 3 个观测点，即坑底和两侧坡上，并且趋势明显，坑底最高，坡上较低，在 1 m 高度以上，西南坡略高于东北坡，以下则反，不过近地表 10 cm 高度时西南坡最高，然后依次为坑底和东北坡（如图 6 所示）。

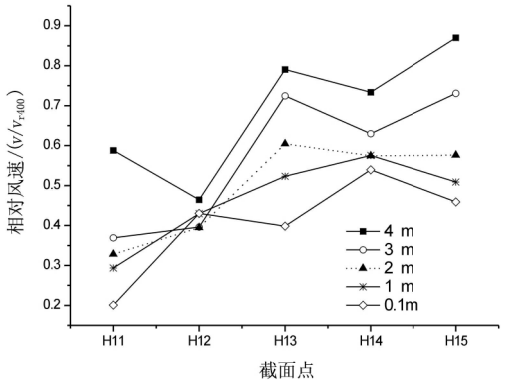


图 5 坑长 1/4 处横截面各点相对风速
Fig. 5 The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the first cross section

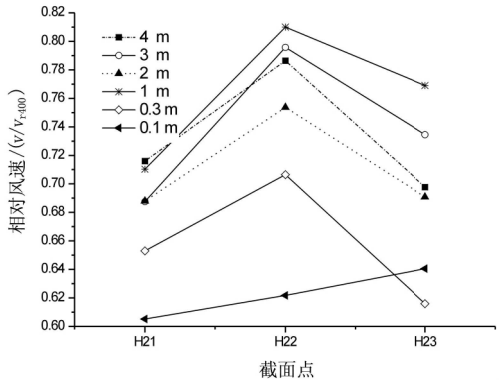


图 6 坑长 1/2 处横截面各点相对风速
Fig. 6 The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the second cross section

在坑长 3/4 处的横截面上，也设了三个观测点，趋势特别明显，坑底最高，两侧坡上较低，西南坡高于东北坡（如图 7 所示）。

当气流斜向进入风蚀坑时（风向约 350°～170°），表面气流的特点如下：

气流速度总体上是先降低，然后在 3/4 处升高到最大，积沙坡脚前急剧降低至最小，然后又逐渐加速。但是在 3/4 点之前，气流比较紊乱，1 m 高度的风速最高，3 m 和 4 m 高度的风速较低，低于近地表风速，在 1/4 点处到 1/2 点处的过程中，除 3 m 高度风速外别的高度都有降低趋势（如图 8 所示）。

在坑长 1/4 处的横截面上，东北侧坡上除 4 m 高度外，各高度风速都小于坡脚，坡脚的风速也大于坑底，西南坡上风速依次大于坡脚和坑底，但在坡脚处，1 m 高度风速较高（如图 9 所示）。

在坑长 1/2 处的横截面上，1 m 高度以上风速，坑底最低，西南坡最高，近地表风速则是坑底较高，两侧坡上较低（如图 10 所示）。

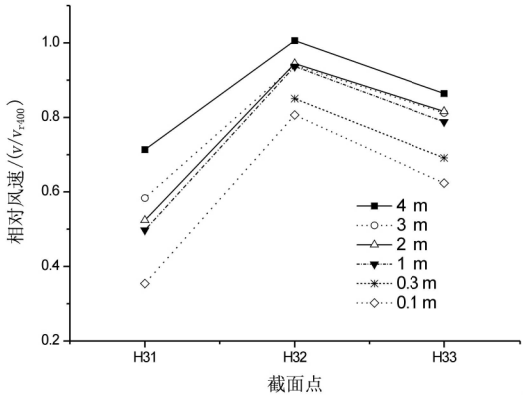


图 7　斜向气流时坑长 3/4 处横截面各点相对风速

Fig. 7　The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the third cross section when the wind obliquely

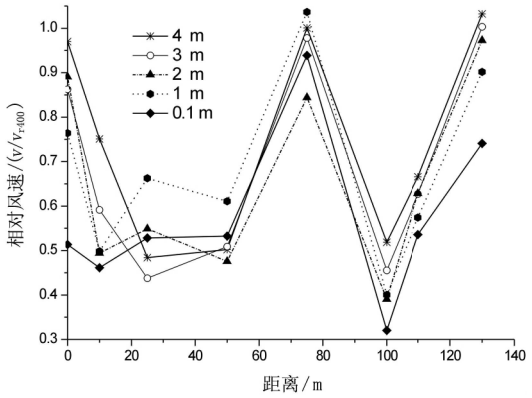


图 8　斜向气流时风蚀坑纵轴线各点相对风速

Fig. 8　The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the central line of the blowout when the wind obliquely

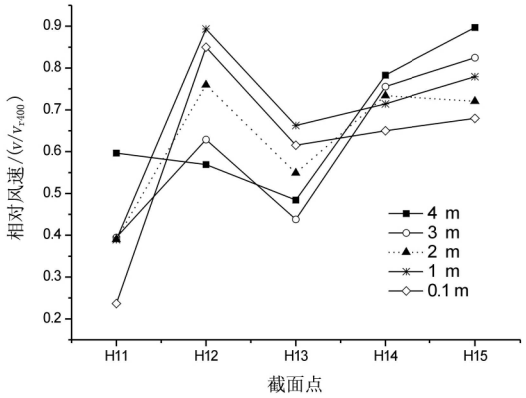


图 9　斜向气流时坑长 1/4 处横截面各点相对风速

Fig. 9　The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the first cross section when the wind obliquely

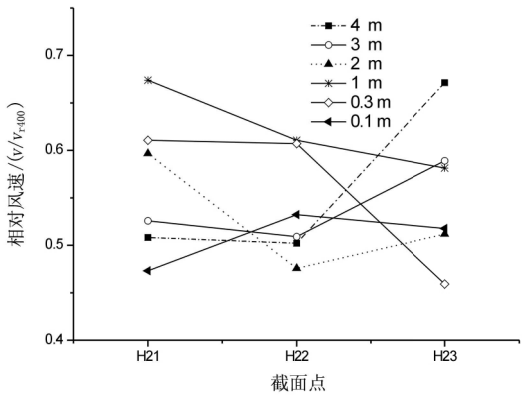


图 10　斜向气流时坑长 1/2 处横截面各点相对风速

Fig. 10　The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the second cross section when the wind obliquely

在坑长的 3/4 处横截面上，总体上各个高度都是坑底风速较高，而西南坡又高于东北坡，但 2 m 高度的风速在坑底时低于其他高度，而在西南坡仅次于 4 m 高度风速，并且 4 m 高度的风速在坑底低于 1 m 高度风速（如图 11 所示）。

3　讨论与结论

在沙质草原上，槽形坑是在碟形坑的基础上，沿强风能方向延伸扩展，三个出风口最终合并而形成的大型风蚀地貌形态，在大部分风蚀坑的东北侧，仍然留有出风口之间没有被侵蚀掉的风蚀残墩，这也可以指示风蚀坑的发育阶段，处在同一发育阶段的坑往

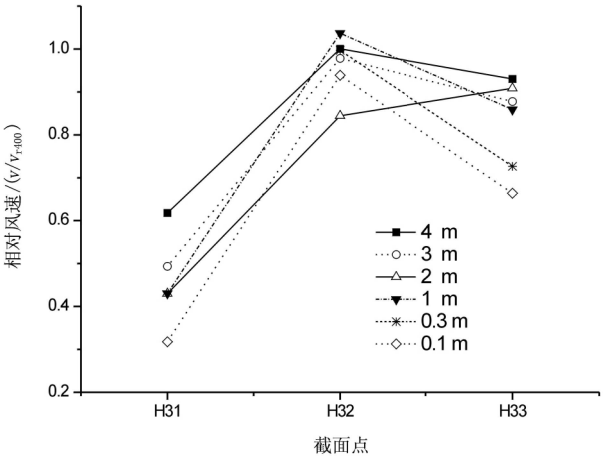


图 11　斜向气流时坑长 3/4 处横截面各点相对风速

Fig. 11　The wind speed expressed as percentage of v_{r400} along the third cross section when the wind obliquely

往具有高度一致的形态和大小。

当气流平行经过风蚀坑时，由于坑内气压较低，气流会被吸入风蚀坑[5]，所以在坑内的前 1/2 距离，风速较低，然后逐渐加速，在坑长 3/4 处，速度达到最高，但在坑后积沙坡脚处，由于气流遇阻且辐散的原因，速度再次降低，直至积沙坡顶逐渐恢复。这与 HESP 在海岸的观测结果基本相同，但草原风蚀坑由于发育在平地上，有很多方面不同于海岸低沙丘上的槽形坑，气流进入海岸沙丘槽形坑是在经过沙丘时被聚集到窄而深的“风口”内，所以在坑内没有减速的过程，并且在侧壁也形成高速气流从而造成大量侵蚀[3]，同时，气流会从侧壁溢出，在坑的边缘形成边缘沙丘。而沙质草原风蚀坑则相反，气流不只在前端入风口处被吸入坑内，在两个侧壁，气流非但不会溢出，反而也被不断吸进坑内，所以，侧壁的侵蚀在一定程度上是由这个过程造成的，气流的不断聚集才能使得坑底气流逐渐加速，从而使坑底不断被侵蚀加深，直至出露地下水。气流在坑前遇阻并减速，造成沙物质沉积，从而形成坑后积沙坡，但由于坑底可侵蚀物质越来越少，风沙流含沙量较少，也会促使坑后积沙坡不断后退，风蚀坑继续沿风向延伸扩展。

当气流斜向经过风蚀坑时，和发育在海岸低沙丘上的槽形坑不同的是，海岸风蚀坑内大部分气流是由坑前入风口进入的，但沙质草原上的槽形坑，由于其发育在平地上，所以气流一般是从风向方的侧壁被吸入风蚀坑的，由于侧壁坡度较陡，气流在进入过程中形成分离流[6]，到达对面侧壁后形成反向回流，这样的话，就会造成进入侧的侧壁被侵蚀，而对面侧壁上有沙物质沉积的现象。由于研究区西北风要多于西南风，久而久之，就会造成风蚀坑东北侧凹，西南侧凸的现象[7]。整体来看，气流在坑内前部形成螺旋流，在坑底后部形成高速流，积沙坡脚减速后又逐步恢复溢出风蚀坑。

[参考文献] (References)

[1] 庄燕美，哈斯. 沙丘风蚀坑的形态及动力过程的研究进展[J]. 干旱区地理，2005，28 (5)：632～637.
ZHUANG Y M，HASI E D. Progress of the study on shapes and dynamical process of blowouts on dunes[J]. Arid Land Geography，2005，28(5)：632～637. (in Chinese)

[2] COOPER W S. Coastal sand dunes of California[C]. Geological Society of America Memoir，101，1967.

[3] HESP P A. Foredunes and blowouts：initiation，geomorphology and dynamics[J]. Geomorphology，2002，48(1)：245～268.

[4] FRASER G S，BENNETT S W，OLYPHANT G A，et al. Windflow circulation patterns in a coastal dune blowout [J]. Journal of Coastal Research，1998，14(2)：451～460.

[5] HESP P A. Flow dynamics in a trough blowout[J]. Boundary-Layer Meteorology. 1996，77(3～4)：305～330.

[6] 哈斯，王贵勇. 沙丘背风侧气流的变化特征及其意义[J]. 地理科学，2000，20 (6)：573～576.
HASI E D，WANG G Y. Variation in dune lee-side airflow and its significance[J]. Scientia Geographica Sinica，2000，20(6)：573～576. (in Chinese)

[7] 庄燕美. 沙质草原风蚀坑形态及其土壤与植被变化[D]. 北京：北京师范大学，2006.
ZHUANG Y M. Blowouts in sandy grassland：morphology，soil and vegetation[D]. Beijing：Beijing Normal University，2006. (in Chinese)