

文章编号:1674-1730(2011)06-0055-07

# 拐子湖地区二、三月份沙尘暴起沙浅析

李引涓\*

(新疆师范大学 地理科学与旅游学院,新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:**在巴丹吉林沙漠北缘拐子湖地区属于戈壁与沙漠过渡地带,起廊道作用。研究目的是对拐子湖地区沙化治理研究提供科学的理论依据,通过沙粒撞击动能分析和表摩擦速度和粗糙度的等计算,野外观察和实验的方法。在沙尘暴加强观测实验场,纬度  $41^{\circ}22'N$ ,经度  $102^{\circ}22'E$ ,海拔为 960m,选取 2011 年 2~3 月的沙尘暴过程的数据。经计算二、三月份中 10cm 处沙平均动能为 0.77J,平均风速  $v$  为  $3.91m \cdot s^{-1}$ ,沙粒平均质量  $m$  为 0.100843 克,摩阻速度  $u^*$  平均值为  $0.2161m \cdot s^{-1}$ 。

**关键词:**沙尘暴; 临界起沙风速; 摩阻速度

**中图分类号:**X14      **文献标识码:**A

## The Research on Sandstorm of Cripple Lake during February and March

LI Yin-min

(College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang)

**Abstract:** Badain Jaran Desert and Cripple Lake lies in the northern edge of desert part of the transition zone, and plays the role of corridor. The study purpose of this paper is to provide a scientific basis for desertification control studies on cripple Lake. The study method are analysis of impact kinetic energy, calculation the surface friction velocity and roughness, field observation and experimental. Experimental field in the dust storm to strengthen observation, latitude  $41^{\circ} 22'N$ , longitude  $102^{\circ} 22'E$ , altitude 960m, select the February-March 2011 dust storm process data. The calculation of two, three month average kinetic energy of the sand at 10cm 0.77J, the average wind speed  $v$  is  $3.91ms^{-1}$ , the average mass sand is 0.100843 grams, the average friction velocity  $u^*$  is  $0.2161ms^{-1}$ .

**Key words:** sandstorm; the speed of sand wind friction velocity; the speed of critical

### 引言

沙尘暴产生的大气沙尘。其对太阳短波辐射和地球长波辐射的散射和吸收,可以产生重要的直接气候效应,沙尘粒子还可以作为云凝结核(CCN)影响云的形成、云的辐射特性和降水,产生间接的气候效应。<sup>[1]</sup>国际、国内对沙尘暴特征及成因的研究有很大发展。李耀辉系统分析了华北地区沙尘暴的天气气候特征,指出新疆、甘肃、宁夏及内蒙古西部是沙尘暴多发区。姜学恭等<sup>[3]</sup>对沙尘暴过程进行的数值模拟及针对内蒙古中西部沙尘源地影响的敏感性试验表明:内

蒙古中西部荒漠化草原生态的迅速恶化是沙尘天气频繁发生的一部分原因。沙尘暴日数与植被覆盖率之间呈现负的相关关系,这种相关关系在不同地貌类型区和不同季节有所差异<sup>[4]</sup> Pauley<sup>[5]</sup> 和 Karyampudi<sup>[6]</sup> 研究表明,高空急流出口区次级环流下沉支能够导致对流层高层动量的下传。高空急流动量下传、锋面和锋面次级环流对西风的增强对沙尘暴的形成有重要作用<sup>[7]</sup>。本文利用巴丹吉林沙漠北缘拐子湖地区 2011 年 2~3 月份开始的沙尘暴加强观测实验资料,分析沙地下垫面微气象要素在沙尘暴过程中的变化情况,探讨沙

\* 收稿日期:2011-05-12

作者简介:李引涓(1984—),男,甘肃靖远县人,硕士研究生,主要从事景观生态研究。

尘暴天气过程中起沙与风速等微气要素的关系,为沙漠地区起沙机制提供一定的研究基础.

## 1 研究区域概况

拐子湖位于内蒙古额济纳旗范围内,是巴丹吉林沙漠的北部边界. 见(图1)拐子湖地区属大陆性气候,年均温7~8℃,冬季绝对最低温-30.7℃,夏季极端最高气温达44.8℃,地表温度则更高,沙面温度可达80℃,高温酷热.

冬、春季大风强劲风沙大,年平均8级以上的大风近百天,年平均沙尘暴30天,历史最大风速为38米/秒. 大风多是这里的主要气候特征,年均风速4米/秒,主要为西北风、西风,从东向西降水量和相对湿度逐渐减少,蒸发量和风速则逐渐加强. 是内蒙古地区风能资源最丰富的地区之一.

拐子湖面积曾今达600多平方公里,湖泊水是来自祁连山冰川积雪的补给,陈建生<sup>[8]</sup>研究发现在祁连山—巴丹吉林沙漠—额济纳盆地之间存在一条“地下河”,拐子湖靠巴

丹吉林沙漠的地下水进行补给,由于黑河流域下游的额济纳旗地区,蒸发蒸腾量的增加和黑河断流的影响,深层水越流补给浅层需要较长的时间,造成了拐子湖浅层地下水位的下降,拐子湖属于温带干旱气候区,气候极为干燥,降水稀少,且多集中在6~8月份,蒸发量却,历年平均降水量41mm,而历年平均蒸发量为4217.9mm,是降水量的40倍,炎热、光照强烈,是内蒙古自治区光照最充足、太阳能资源最丰富的地区之一. 拐子湖地区的牧民介绍上世纪50~70年代是3~4年一场透雨,80~90年代是10年一场透雨,自从90年以来13年间未下过几场透雨,目前植被生存完全依靠地下水,草场退化非常严重.

从而加剧了胡杨林等植被的死亡生态恶化. 浅水的水质普遍较差,矿化度达到3—4g/L,根本不能饮用,风蚀则更加剧的土壤的盐碱化. 由于全球温度升高,拐子湖在80年代初湖水面积还很大,水深达到5—6a,20世纪90年代初干涸,现在湖泊逐渐消失.

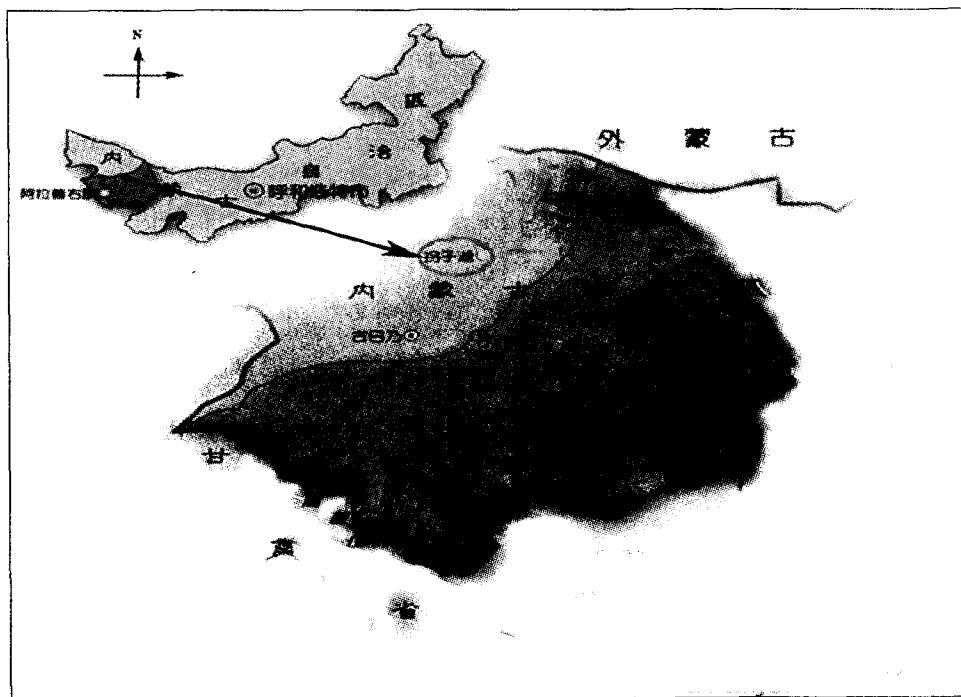


图1 拐子湖地区位置图

地貌形态缓和,主要为剥蚀低山残丘与山间凹地相间组成,第四纪沉积物普遍覆盖于地表,形成广泛分布的戈壁和沙漠. 沙丘上植物较少. 仅于沙丘下部或丘间低地生长有稀疏灌木、半灌木,除梭梭林外,主要生长有沙蒿,盖度多在5%左右.

## 2 数据的获取与处理

本文利用沙尘暴加强观测实验场位于巴丹吉林沙漠北缘的拐子湖气象站南 800m 处一平坦的沙地上, 纬度  $41^{\circ}22'N$ , 经度  $102^{\circ}22'E$ , 海拔为 960m, 在观测场布置风蚀起沙监测系统一套, 其中 H11-LIN 型风蚀传感器由美国 Sensit 公司生产, 安装高度为 5cm、10cm, 可测量沙尘天气过程的沙尘撞击颗粒数、撞击动能及沙粒运动速度, 结合贴地层风速梯度仪, 可求出沙尘天气过程的起沙临界摩擦速度. 实验设备贴地层梯度风速、风向仪, 风速安装高度为 20cm、50cm、100cm、200cm, 风向安装高度为 20cm、200cm, 200cm 高度安装有空气温湿度传感器, 可监测沙尘天气过程中贴地层风速廓线特征. 本文选取 2011 年 2~3 月的沙尘暴过程的数据, 并以 Photoshop 进行图片处理, 用 EXCEL 和 SPSS 软件进行统计处理.

## 3 沙尘暴过程中的起沙一些参数的分析

### 3.1 平均风速与撞击颗粒关系

沙尘暴是土地沙漠化的重要标志之一, 是生态环境退化或恶化的直接产物, 我国是受荒漠化严重危害的国家之一.<sup>[10]</sup> 这是两个月连续风速与撞击颗粒数分布如(图 4)反映了有阶段性的沙尘天气中 2 月 22、23、27、28 日共四天无撞击颗粒, 3 月 1、2、4、5、6、7、9、15、16、18、19、23 日共十二天无撞击颗粒, 而有撞击颗粒天数 2 月 21、24、25 共三天, 3 月 8、10、11、12、13、14、17、20、21、22 日共十天. 说明有风天比较频繁, 从 2 月到 3 月有逐渐增强趋势. 2 月总撞击颗粒数是 29168 个, 3 月总撞击颗粒数 126419 个, 两个月总撞击颗粒数除以总起沙风天数得到平均每天撞击 11968 个, 风沙流中撞击颗粒主要是近地表粗粒跃移方式.

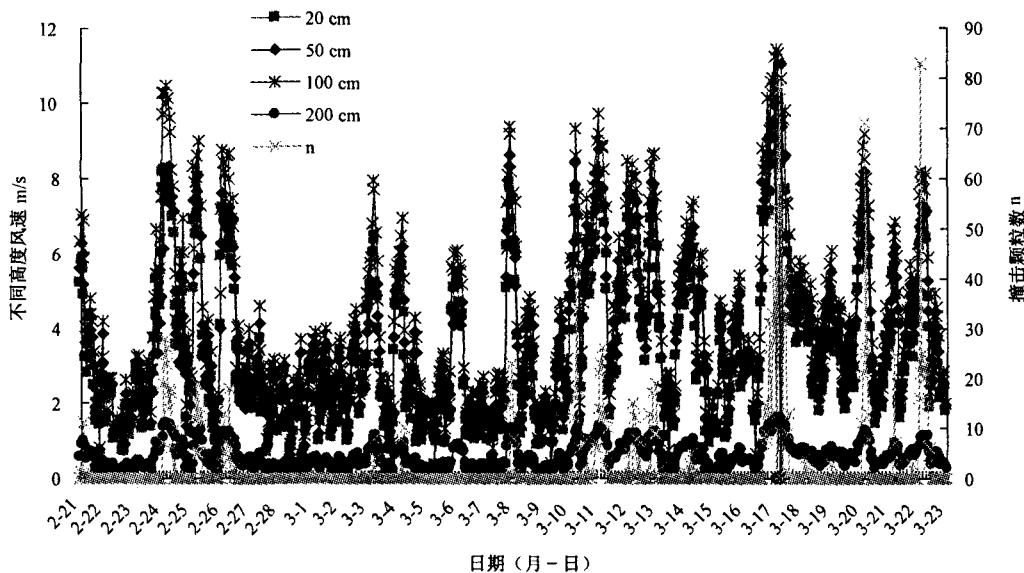


图 2 两月内风速与撞击颗粒数关系

20cm、50cm、100cm、200cm 不同垂直风速、风向切变及热力不稳定层, 风将地面尘沙吹起, 使空气相当混浊, 不稳定的热力条件使不同梯度风力速加大、强对流发展, 从而夹带更多的沙尘颗粒, 并卷扬得更高. 从图(2)中看出 3 月 17 日 20cm 风速  $11\text{ms}^{-1}$  是撞击颗粒达到 78 个, 200cm 风速  $12.17\text{ms}^{-1}$  撞击颗粒 11 个, 而在横轴上 0 撞击反映了超过起沙风的高度要求, 说明风沙流中起沙撞击颗粒随风速高度变少.

根据观察, 在粒径  $0.10\sim0.25\text{mm}$  为主的干燥裸露的沙质地表中, 绝大部分沙粒撞击都在离地表 200cm 风速以内, 特别集中在 20cm 风速以下. 计算四个高度的平均风速结果表明当平均风速为  $3.9167\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 测得含沙量 90% 都分布在地表 20cm 风速之内. 撞击颗粒也随风速而变化, 当风速显著超过起沙风速( $4\sim5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )后, 风沙流中的沙撞击颗粒急剧增加. 风速愈大, 在地表 20cm 内沙撞击颗粒的绝对值也愈大.

通过 F 检验表 1 不同高度风速线拟合指数方程与撞击颗粒指数方程在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

表 1 不同高度风速线拟合指数方程

	高度	指数方程	相关系数
撞击颗粒	5cm	$y = 1.2875 \ln(x) - 4.2631$	$R^2 = 0.0154$
风速	20cm	$y = 0.2831 \ln(x) + 1.7939$	$R^2 = 0.0206$
	50cm	$y = 0.3641 \ln(x) + 1.6436$	$R^2 = 0.0307$
	100cm	$y = 0.3366 \ln(x) + 2.2875$	$R^2 = 0.0199$
	200cm	$y = 0.3592 \ln(x) + 2.4206$	$R^2 = 0.0201$

### 3.1.2 沙尘暴最强烈的一日风速与捕获颗粒数分析

两个月以来沙尘暴天气中风速最大和撞击颗粒数比较强烈的一天是 3 月 17 日,说明此日沙尘暴最强烈,所以利用 H11-LIN 型风蚀传感器在 5cm 高度捕获的起沙颗粒,选取贴地层不同高度处的风速,分析二者之间的关系,如(图 3)可以看出,在 20cm 处风速最大的时段 5cm 高度捕获的沙粒数最多.

从图上还可以看出,在沙尘暴开始的 1:50(北京时间)前地面就开始起沙,到下午 21:00 结束,其中在中午 2:00 风速最大,在 20cm 高度的风速达到  $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  是地面开始起沙,可以把这个风速近似作为该地的临界起沙风速. 砂尘颗粒只有在一定的风力条件下才开始运动,当风力逐渐增大到某一临界值之后,地表砂尘颗粒才开始脱离停止状态而进入运动,这使沙尘颗粒开始运动的临界风速称为起动风速,一切超过起动风速的风谓之起沙起尘风.<sup>[8]</sup> 据观测,风速达  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,直径  $0.5 \sim 1 \text{ mm}$  的沙粒可飞扬几十厘米高, $0.125 \sim 0.25 \text{ mm}$  的沙粒飞扬  $2.0 \text{ m}$  高. 比张宏升<sup>[9]</sup> 在浑善达克沙地地区得到的临界起沙风速  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  要小,也比申彦波等<sup>[10]</sup> 在敦煌沙地上观测到的临界起沙风速  $7 \text{ m/s}$  要小. 考虑到不同地区沙粒径的差异,这个数值还是可信的.

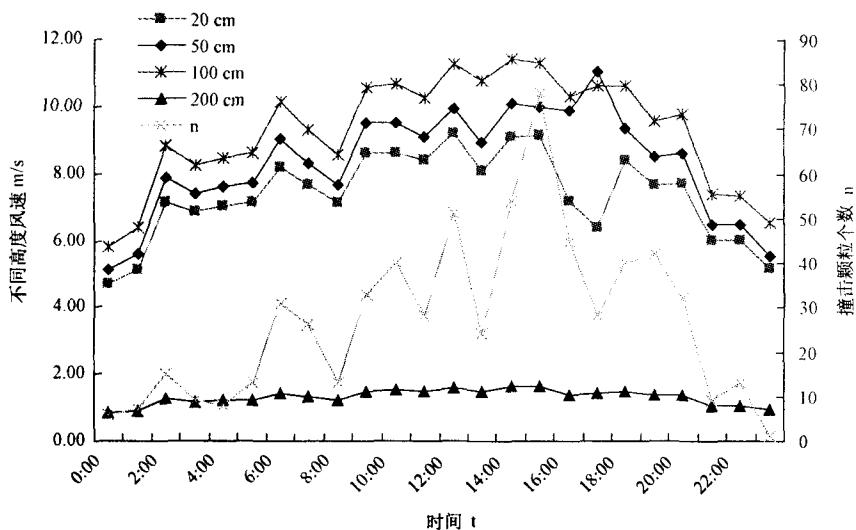


图 3 平均风速与捕获颗粒数关系

20cm 平均风速和在 5cm 高度捕获的起沙颗粒数,根据 Pearson 相关性,在 0.01 水平(双侧)上显著相关, Anovab 回归, F 检验  $15.864$ , 20cm 平均风速对数方程  $y = 0.0178x + 7.144$ , 显著性水平  $R^2 = 0.0096$ , 5cm 捕获沙颗粒数对数方程  $y = 0.7922x + 17.014$ , 显著性水平  $R^2 = 0.0887$ . 从图 2 中可以看出从 4:00 过后风速加大,到中午 3:00 后随着风速减弱撞击颗粒也减少. 图中贴地层 20cm 高度风同两层风蚀传感器捕获沙粒颗数变化关系反映了相关性很好.

### 3.2 沙粒撞击动能分析

沙粒在碰撞过程中,沙粒相互作用的时间极短,但力却很

大,而且力在这短的时间内变化十分剧烈,力对沙粒的冲量,使沙粒的动能发生变化,而且冲量等于沙粒动量的变化量. 动能研究对象可以是一个质点,所以本文研究沙粒单体.

动能公式  $E = (1/2)mv^2$ ,  $E$  表示动能,在国际单位制中是焦耳,符号( $J$ ).  $m$  为质量,  $v$  为速度. 经计算二、三月份中 10cm 处沙平均动能为  $0.77 \text{ J}$ , 平均风速  $v$  为  $3.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 可求得沙粒平均质量  $m$  为  $0.100843 \text{ g}$ (克). 沙粒的速度越大,质量越大,具有的动能就越大. 运动速度相同的沙粒,质量越大,它的动能也越大.

### 3.3 地表摩擦速度和粗糙度的计算

地表摩擦速度( $u^*$ )是确定沙源地区地表能否起沙的有效判据之一<sup>[11]</sup>。风蚀起沙观测和实验结果显示:当 $u^*$ 超过某一阈值时,粒子便会脱离地面进入大气,该摩擦速度称为临界摩擦速度,用 $u^* t$ 表示。在无风沙运动的床面上大气呈中性时,风速与高度的对数值成正比,风速对数廓线才存在:

$$u = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

$$u = 5.75 u^* \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

式中, $u$ 为高度 $z$ 处的风速, $u^*$ 为摩阻速度, $z$ 为高程, $z_0$ 为粗糙度,当 $z=z_0$ 时,则 $u=0$ ,即在高程等于粗糙度时,风速为零。根据公式上面公式,利用两个观测高度的风速差推导出如下计算公式:

$$\lg z_0 = \frac{u_1 \lg z_2 - u_2 \lg z_1}{u_1 - u_2} \quad (3)$$

$$u^* = \frac{u_2 - u_1}{5.75 (\lg z_2 - \lg z_1)} \quad (4)$$

取50cm和200cm两层风速资料,利用公式(3)计算得到695个和粗糙度值 $z_0$ ,范围是 $0.1 \times 10 \sim 11$ 到 $0.1m$ ,平均粗糙度为 $-4.10780.0014m$ ,变化范围同张瑞军<sup>[12]</sup>在新疆肖塘地区计算的最小值数量级一致,最大值要大和平均值都要大。利用(4)计算摩阻速度 $u^*$ ,在到在中性层接条件下,摩阻速度 $u^*$ 的范围在 $-0.09821 \sim 0.979824 m \cdot s^{-1}$ 之间变化,平均值为 $0.2161 m \cdot s^{-1}$ ,考虑到其是计算沙漠边缘过度带上的数值,本文的计算结果是可信的。

### 3.3 1200cm 和 50cm 高度风速对摩阻速度 $u^*$ 影响

沙丘实验时,用双面胶带放在沙盘下风向边缘处捕获运动沙粒,通过肉眼观察,胶带上有沙粒时,视为沙粒运动。此方法与许多研究者(例如, Mu sik 等<sup>[13]</sup>)使用的方法相同。风速廓线用风速廓线仪<sup>[14]</sup>观测。用最小二乘法回归所观测的风速廓线资料计算摩阻速度。用式子

$$U_z = A + B \ln Z \quad (1)$$

拟合观测的2个高度(200, 50.0cm)的风速资料。

$$\text{因而: } U_3 = k B \quad (2)$$

式中: $U_z$ —高度 $Z$ 处的风速; $A, B$ —回归系数; $k$ —卡

曼常数,0.4; $U_3$ —摩阻速度。

$$y = 0.5191 \ln(x) + 1.5385 \quad U_3 = 0.20764$$

$$y = 0.5017 \ln(x) + 0.8869 \quad U_3 = 0.20068$$

200cm高度的风速地摩阻速的影响非常明显,见(图5)随着风速的增大,摩阻速度同时增大,呈线性。

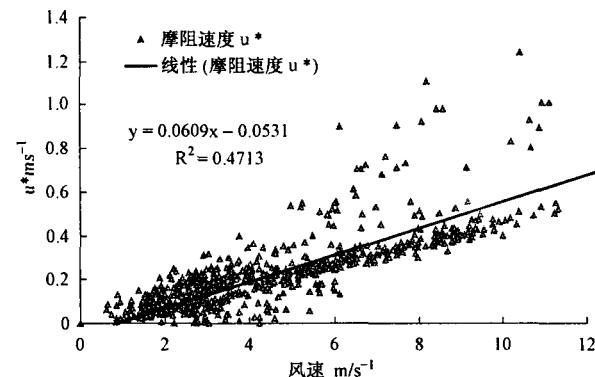


图4 摩阻速度 $u^*$ 与200cm风速的关系

经过 $t$ 检验值为28.443,对695个数据计算,200cm两层风速均值4.41948,标准差2.510183, $u^*$ 在.01水平(双侧)上显著相关。

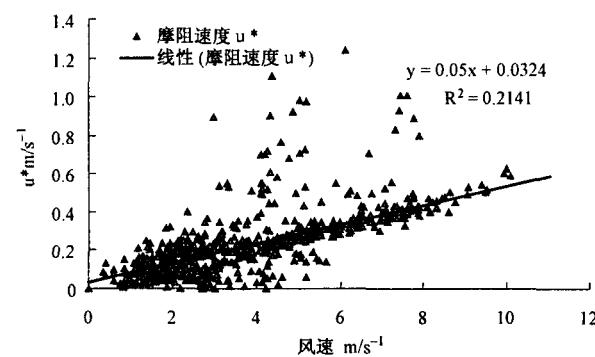


图5 摩阻速度 $u^*$ 与50cm风速的关系

经过 $t$ 检验值为28.443,对695个数据计算,50cm风速均值为3.67137,标准差为2.058719, $u^*$ 摩阻速度为0.2463,Pearson相关性在0.01水平(双侧)上有显著相关,拟合方程 $y = 0.05x + 0.0324$ ,相关系数 $R^2 = 0.2141$ ,和 $y = 0.0609x - 0.0531$ ,相关系数 $R^2 = 0.4713$ ,相关性非常好从(图6)可以看出。所以风速增大时,摩阻速度必然增大,输沙量也相应随之提高。

### 4 风沙流的方位变化

风是塑造地貌形态的基本营力之一<sup>[15]</sup>,特别是在干旱

气候条件下,它是决定沙漠地表形态的主要动力<sup>[16]</sup>,也是造成风沙危害的直接动力条件<sup>[17, 18]</sup>因此研究风沙活动强度不仅是深刻揭示沙丘形成演变的前提条件,也是为区域沙害防治服务的理论依据。

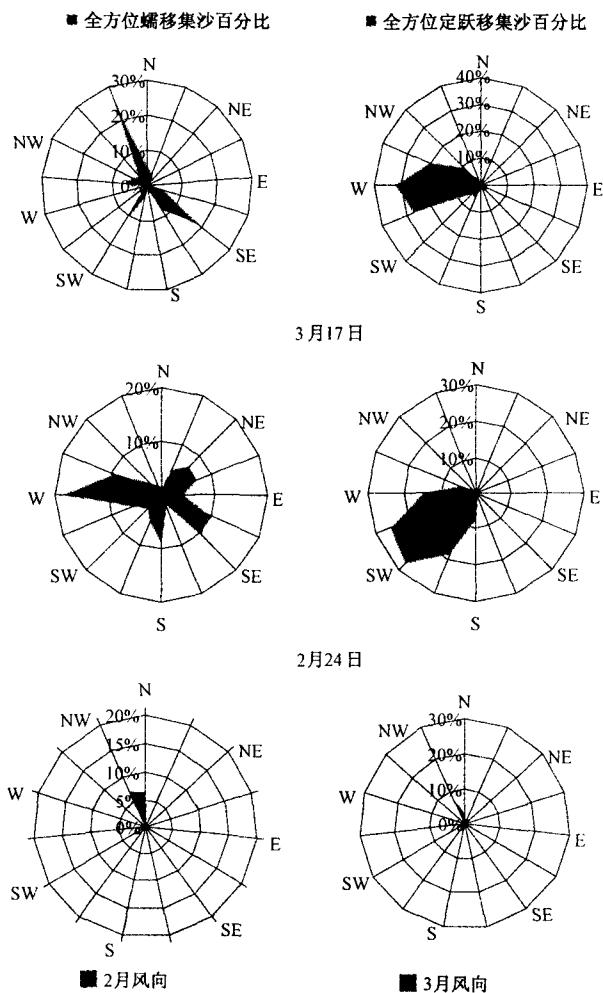


图 6 拐子湖地区风沙流积沙的方向分布

从全方位定点(跃移)和蠕移集沙仪收集的各方位积沙量了解野外实际观测风沙流的空间分布特征,图 3 是在拐子湖地区的平坦沙地上两个月内典型沙尘天气过程中,全方位定点(跃移)和蠕移积沙仪采集到的各方位积沙量占总积沙量的比例,由图可以看出,两次沙尘天气过程中,2月 24 日和 3 月 17 日风向以西北风和西风为主,西方来风的频率高,风频的相对大,气流运动大能量转移频繁。关于沙粒蠕移量的方向变化,我们可以通过图(3)知道,3月份主要在 NNW、SE 风向上蠕移输沙量占总积沙量的 30%,而 2 月份主要在 W 风向上蠕移输沙量占总积沙量的 20%,其余在 S、SE、NE 风向上蠕移输沙量占总积沙量的约等于 10%。蠕移量的空间分布变

化与风向具有明显的不一致性,从这一点也更说明了沙粒的蠕移运动可能更多的是借助跃移沙粒的冲击力来实现的。跃移由图可以看出,每次沙尘天气的输沙量主要集中在西方与西北方向,两次沙尘天气过程中,SW、W 两个方位的输沙量占总输沙量的 30%。

本文利用的拐子湖沙漠气象实验观测站的自动计风速风向资料,对拐子湖沙漠风沙活动强度进行了系统研究,以便为区域风沙地貌研究和沙害防治实践提供理论依据。沙风速直接影响着输沙量的大小所以对沙粒起沙风速的研究具有重要的理论和实际意义。拐子湖地区有沙丘,沙丘是风力作用下沙粒的堆积体,其形成发育过程与气候变化、风信状况和沙源供应等自然环境密切相关。<sup>[19]</sup>从研究区起沙风玫瑰可以看出(图 7),监测区主导风向为西北风。其中,拐子湖地区不是是一典型单风向地区,受大气环流影响,研究区风况具有明显的方向性和季节性,春季季盛行西北风,冬季盛行短暂的东风。研究区主要有来自沙漠外围的西北风、西风系。

## 5 结论

通过对巴丹吉林沙漠北缘拐子湖地区沙尘暴起沙观测试验,选取 2011 年 2~3 月 13 次沙尘暴过境前后数据,分析微气象要素在沙尘暴过程中的变化,沙尘暴过程中一些起沙参数进行了计算,得出如下结论:

(1) 在沙尘暴过境前贴地层风速风向经过了一个波动调整加速过程,撞击颗粒在 5cm 高度同时在风速  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  处风速最大的时段捕获的沙粒数最多。在粒径 0.1~0.25mm 为主的干燥裸露的沙质地表中,绝大部分沙粒撞击都在离地表 200cm 风速以内,特别集中在 20cm 风速以下。

(2) 在风沙物理学研究中,沙粒开始运动时的临界风速值称为起动风速<sup>[20]</sup>。风沙运动其实质是沙粒在风力作用下的输运过程,因此起动风速对于风沙运动的研究具有最基本的意义。 $200 \text{ cm}$  和  $50 \text{ cm}$  高度的风速地摩阻速度  $u^*$  平均值为  $0.2161 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的影响非常明显,随着风速的增大,摩阻速度同时增大,呈线性。经计算二、三月份中 10cm 处沙平均动能为  $0.77 \text{ J}$ ,平均风速  $v$  为  $3.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,求得沙粒平均质量  $m$  为  $0.100843 \text{ 克}$ 。

(3) 风玫瑰图来反映拐子湖地区的气流运动春季蒙古气旋强劲活动频繁,沙尘天气过程中以偏西风和西北风为主,在

W风向上蠕移输沙量占总积沙量的20%~30%之间,跃移在SW、W两个方位的输沙量占总输沙量的30%。偏西风出现的频率为7%,WN、W两个风向的频率为10%,这与整个拐子湖区域的年盛行风向一致。

(4)拐子湖地区是西伯利亚高压和蒙古高压交汇处,又受巴丹吉林沙漠湍流的影响下强风把地面大量沙尘卷入空中,使空气特别混浊,水平能见度小于1km。具备沙尘源、强风和不稳定的大气层结三个条件使二、三月份沙尘暴频繁,形成了风成砂沉积层下伏细砂和粘土质粉砂互层沉积为主的河湖相地层<sup>[21]</sup>。季节性阶段性沙尘暴起沙风影响比较大的情况下与形成拐子湖地区风蚀沉积层有关系。

#### 参考文献:

- [1] 沈志宝, 申彦波, 杜明远, 汪万福. 敦煌春季沙尘天气过程中某些参量和影响因子的变化特征[*J*]. 2003, 22(6).
- [2] 李耀辉. 我国西北地区沙尘暴分析. 沙尘暴气象服务工作研讨会交流材料, [C].
- [3] 李彰俊, 姜学恭, 程丛兰. 内蒙古中西部沙源地影响沙尘暴扩展过程的数值模拟研究. [J]. 中国沙漠, 2006, 27(5): 851—858.
- [4] 顾卫, 蔡雪鹏, 谢锋, 李彰俊, 吴学宏. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨—以内蒙古中西部地区为例. [J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 273—277.
- [5] Takemi, T. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, 127, 1301—1309.
- [6] Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer, D. R.: 1995, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR/TN-398 + STR.
- [7] 韩经纬, 沈建国, 孙永刚, 宋桂英. 一次强沙尘暴和雪暴天气过程的诊断及模拟分析[J]. 高原气象, 2007, 5(26): 1031—1037.
- [8] 卢琦, 杨有林, 全球沙尘暴警世录[M]. 中国环境科学出版社, 2001, 8.
- [9] 陈建生, 汪集. 试论巴丹吉林沙漠地下水水库的发现对西部调水计划的影响[J]. 2004, (22)3.
- [10] 申彦波, 沈志宝, 杜明远等. 敦煌春季沙尘天气过程中某些参量和影响因子的变化特征[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 378—384.
- [11] 陈楠, 陈豫英, 范小明, 等. 西北地区东部沙尘暴转型的环流演变及差异特征分析[J]. 干旱区地理 2010(33)3.
- [12] 张瑞军. 塔克拉玛干沙漠北部沙尘暴源区粒度及地表参数研究, 2008[D]. 新疆师范大学硕士学位论文.
- [13] Musick H B, T rujillo SM. T ruman C R. Wind tunnel modeling of the influence of vegetation structure on salinization [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 589—605.
- [14] 刘小平, 董治宝. 处湿沙的风蚀起动风速实验研究 2002, (22)2 水土保持通报.
- [15] Skidmore EL. Soil erosion by wind. in: El-Baz F, Hassan MHA. *Physics of Desertification*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers. 1986. 261—273.
- [16] 朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理对策 [M]. 北京: 中国环境出版社, 1999. 113—115.
- [17] 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 1995. 12—132.
- [18] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 315—316.
- [19] 简张克存, 甲斐宪次, 屈建军, 等. 单线性沙丘形成环境及其动力过程研究[J]. 干旱区地理, 2010 (33)3.
- [20] 岳高伟, 宁, 黄郑晓静. 沙粒形状的不规则性及静电力对起动风速的影响[J]. 中国沙漠, 2003, (23)6.
- [21] 唐进年, 苏志珠, 丁峰, 等. 库姆塔格沙漠的形成时代与演化[J]. 干旱区地理 2010(33)3.

【责任编辑 赵建萍】