

# 流动沙丘不同部位风蚀积沙特征研究

闫德仁, 姚洪林, 胡小龙

(内蒙古林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** [目的] 探究和利用流动沙丘各部位的风蚀积沙规律, 为提升固沙技术措施提供依据。[方法] 在典型新月型沙丘上设置 3 台光电式积雪深度测定仪观测流动沙丘不同部位的风蚀和积沙规律。[结果] 在特定风速下落沙坡随着起沙风速变化其积沙深度由 1 cm 逐渐增加到 12 cm, 并在起沙风速下降时形成一个强烈的积沙过程; 迎风坡在起沙风速时处于最大的风蚀状态, 并随风速变化形成一个由强风蚀到弱风蚀的转变过程; 沙丘顶部在临近起沙风速时处于风蚀过程, 并随起沙风速的逐渐增加又处于积沙过程。此外, 流动沙丘迎风坡在 12 月至翌年 5 月间净风蚀深度月均值约为 29.85 cm; 落沙坡在 12 月至翌年 6 月间积沙深度月均值净增加 139.5 cm; 而沙丘顶部在 3—11 月为风蚀发生期, 平均风蚀深度变化值为 27.3 cm, 12 月至翌年 3 月为积沙发生期, 平均积沙深度变化值为 29.47 cm。[结论] 风速对流动沙丘不同部位风蚀积沙特征变化具有重要影响, 而且不同部位风蚀积沙程度存在明显差异。

**关键词:** 流动沙丘; 风蚀积沙特征; 起沙风速; 动态变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0288-05

中图分类号: P931.3, S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.050

## Characteristics of Wind Erosion and Accumulated Sand in Different Positions of Mobile Dune

YAN Deren, YAO Honglin, HU Xiaolong

(Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

**Abstract:** [Objective] Exploration and utilization study on the law of wind erosion and accumulated sand in different parts of mobile dune can provide the support for sand fixation technical measures on the desert combat. [Methods] Three instruments of photoelectron snow retention depth-sounder were set up in the typical crescent dune to determine the wind erosion and accumulated sand process in different positions of mobile dune. [Results] The accumulated sand depth ranged from 1 cm to 12 cm gradually on sand falling slopes with the change of sand-driving wind velocity under the certain wind velocity scope. And the strong sand deposition process was observed when sand-driving wind velocity declined. Windward slope erosion was in the largest state at the sand-driving wind velocity. And the transition process from strong to weak wind erosion formed with the change of sand-driving wind velocity. The top of the dune was erosion process at the near sand-driving wind velocity. And accumulated sand process was found at the top of the dune with the gradual increase of sand-driving wind velocity. In addition, the monthly mean of net wind erosion depth on windward slope of mobile dune was 29.85 cm from December to next May. The monthly mean net increase of accumulated sand depth on the sand falling slope of mobile dune was 139.5 cm from December to next June. But the erosion occurrence at the top of the dune was found from March to November, and the change value of the average erosion depth was 27.3 cm. The accumulated sand occurrence was found at the top of dune from November to next March, and the change value of the average accumulated sand depth was 29.47 cm. [Conclusion] Wind velocity has the important influence on wind erosion and deposition characteristic change in different positions of mobile dune, and wind erosion and accumulating sand were obvious difference in different parts of mobile dune.

**Keywords:** mobile dune; wind erosion and accumulated sand; sand-driving wind velocity; dynamic changes

收稿日期: 2014-05-19

修回日期: 2014-06-12

资助项目: 国家“十二五”科技支撑课题“浑善达克沙地治理与近自然植被修复技术集成与示范”(2012BAD16B0204)

第一作者: 闫德仁(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 研究员, 主要从事沙漠治理研究。E-mail: nmglkyydr@163.com。

风蚀积沙是风沙流作用流动沙地表面的一种自然过程,通常包括风蚀、堆积和搬运 3 种状态。其中,风蚀是搬运的开始,堆积是搬运的结束,而搬运则是风蚀和积沙的转化。所以,风蚀积沙规律在沙漠治理中具有非常重要的应用价值<sup>[1]</sup>。通常情况,风沙流在移动过程中其含沙量由不饱和到饱和状态是一个渐变的过程,因此,流动沙丘不同部位其风蚀积沙过程也不同,即使是同一部位由于风速的变化也会存在着风蚀或积沙过程。为定量观测流动沙丘各部位风蚀积沙规律,采用光电子式积雪深度测定仪开展本项研究,科学利用流动沙丘表面的风蚀积沙规律,为有效控制流动沙丘风蚀积沙过程而制定采取科学的固沙技术措施提供依据,提高固沙的技术效果。

## 1 研究方法

为定量观测流动沙丘各部位风蚀积沙特征及其与特定风速的变化规律,选择 1 个典型新月型沙丘,并在其流动沙丘的主轴上设置 3 台(迎风坡中部 C,沙丘顶部 A,落沙坡中部 B)光电子式积雪深度测定仪(法国制造,原用于滑雪场测定积雪深度的精密仪器,由日本鸟取大学农学部奥村武信先生在中日科技治沙合作研究期间直接引进中国),观测流动沙丘不同部位的风蚀和积沙规律。该仪器能够测定从探头到被测目标表面的距离并智能推算出深度变化,进行自动记录,并将不同时间记录的数据和初始距离的差值作为风蚀积沙深度变化值,分析流动沙丘不同部位的风蚀和积沙变化规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 风速对流动沙丘风蚀积沙特征变化的影响

流动沙丘各部位风蚀积沙深度的动态变化与风沙流特征有直接的关系。因此,在短时间内,风速与流动沙丘各部位的风蚀积沙过程表现出一定的相关性。在特定的风速下,流动沙丘落沙坡和沙丘顶部基本处于积沙过程,而迎风坡则处于风蚀过程<sup>[2]</sup>。从图 1 可以看出,一天之内流动沙丘落沙坡积沙过程和风速变化的动态关系。当风速由 6.5 m/s 增加到 14~

15 m/s(13:00—14:00 时)时,落沙坡表现出一定的积沙过程,积沙厚度在 1 cm 左右,并且基本处于一个较平稳的积沙过程,而当风速达到当天的最大风速时,落沙坡的积沙过程显著加强,积沙厚度在 2 cm 左右,而到 15:00 时以后,随着当天风速的降低,风沙流的移动相对减缓,而在落沙坡由于涡流作用对风沙流产生巨大影响,导致沙粒集聚下落,形成一个强烈的积沙时段,积沙厚度从 2 cm 剧增到 12 cm 左右(15:00—17:00 时)。可见落沙坡的积沙过程同时受风速、风沙流特征和刮风时间长度的影响,也就是说,当达到起沙风速时,随着风速的逐渐加大,落沙坡首先处于一种较平缓的积沙过程;当风速由最大逐渐下降时,风沙流处于不饱和状态,携沙量降低,导致落沙坡的积沙过程加强。

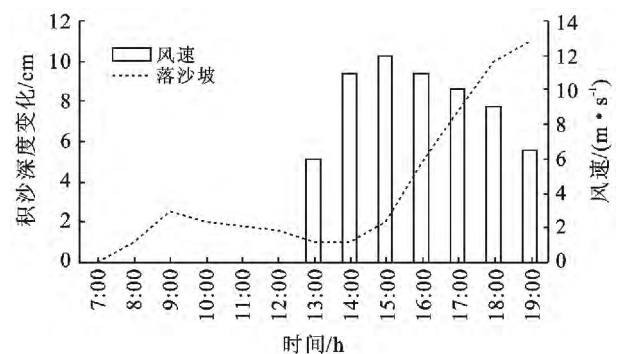


图 1 研究区落沙坡积沙过程和风速变化关系

从流动沙丘迎风坡风蚀过程的动态变化看(表 1),当风速达到起沙风速时,迎风坡处于最大的风蚀状态,以后随着风速增加,直至达到当天的最大风速后,迎风坡的风蚀过程开始减弱。其原因我们认为,随着风速的加大,迎风坡同时进行着风蚀和积沙过程,但以风蚀为主。因为风沙流通过迎风坡时,随着风速的加大,风沙流中的沙粒成分也增加,并受地面局部特征的影响,有一部分沙粒在迎风坡沉积下来,以补充因风蚀作用而吹走的沙粒,形成一个由强风蚀到弱风蚀的过程,导致整个结果有所减弱,掩盖了风蚀作用的强度,即表 1 中的 13:00 时到 16:00 时这段时间的迎风坡的风蚀深度变化特征。

表 1 研究区迎风坡风蚀过程和风速变化关系

测定时间	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0	0	6	11	12	11	10	9	6.5
风蚀深度变化/cm	0	-0.75	-1.5	-2	-2.5	-3.13	-3.5	-3	-2	-1.25	-0.75	-0.88	-0.88

而当风速由最大逐渐降低时,流动沙丘迎风坡处于一个比较平稳的风蚀过程。从图 1 和表 1 可以看

出,落沙坡的积沙特征和迎风坡的风蚀特征变化趋势正好相反。也就是说,在同一时段中,流动沙丘迎风

坡的强烈风蚀时间是 13:00—14:00 时,是起沙风速的初始时间,而不是最大风速时间段,更不是落沙坡的积沙时段。但是,当风速由最大逐渐下降时,迎风坡同时也进行着强烈的风蚀和积沙过程,并形成一个由强风蚀到弱风蚀的转变过程,并以风蚀过程为主,而此时更有利于落沙坡的积沙过程,即当风速由最大逐渐下降时,携沙量降低,并因落沙坡的涡流作用使沙粒集聚下落,导致落沙坡的积沙过程加强。

流动沙丘顶部是连接落沙坡和迎风坡的一个中间部位。从表 2 中看出,流动沙丘顶部基本处于一种由弱风蚀到积沙的过渡特征。当风速达到起沙风速时,沙丘顶部处于风蚀过程,而随着风速的逐渐加大,风沙流经过迎风坡时携沙量增加,并由于落沙坡的涡流作用在沙丘顶部沉积沙粒,沙丘顶部也随之处于积沙过程,当风速(15:00)达到最大时,沙丘顶部的积沙厚度达

3 cm 左右,以后随着风速由最大到逐渐降低,沙丘顶部进行着强烈的积沙过程,积沙厚度可达 8 cm 左右,而当风速继续下降到临近起沙风速时,沙丘顶部又处在一个风蚀过程,使前期的积沙被吹走,正是这个过程削弱了沙丘的高度,并在落沙坡堆积(图 1)。可见,流动沙丘顶部随风速的变化同时进行着风蚀和积沙过程,但这一过程与风速的变化有密切的关系。也就是说,随着风速由低到高或由高到低的变化,在临近起沙风速的时间段,沙丘顶部是处于一种风蚀过程,而当风速超过起沙风速,并逐渐增大时,沙丘顶部是处于一种积沙过程。从沙丘顶部的这种变化特征看,我们可以推断,即在起沙风速时,沙丘顶部处于风蚀过程,因此,从全年或更长时间看,当一个大型流动沙丘形成以后,沙丘的高度是相对稳定的,尽管在短期内有增高的过程,但增高的部位会因风蚀作用而逐渐被削弱。

表 2 研究区沙丘顶部风蚀积沙过程和风速变化关系

测定时间	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
风速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	0	0	0	0	0	0	6	11	12	11	10	9	6.5
积沙深度变化/cm	0	-1	-1.5	-2	-2.2	-2.5	-2	0.5	3	6	7.5	8	2

总之,从特定观测日沙丘不同部位的风蚀和积沙过程看,风速是主要的影响因素,其中,迎风坡基本处于风蚀过程,落沙坡处于积沙过程,而沙丘顶部的变化则同时具有风蚀和积沙过程,并且风速变化过程是决定沙丘顶部风蚀或积沙的主要因素。这和齐之尧<sup>[1]</sup>的研究结果基本一致,均表明沙丘顶部风速最大,风沙流的流线遇到沙丘的阻挡而发生变化,流线上和两翼密集的沙丘部位风速较大,落沙坡因旋涡作用,风速急剧下降。从风蚀和堆积看,迎风坡为风蚀区,其它部位是堆积或以风沙流的形式将沙粒输移。

## 2.2 流动沙丘风蚀积沙特征的动态变化

从年际间流动沙丘不同部位风蚀和积沙情况与风速的关系看,随着时间的延长,迎风坡基本是处于一种持续的风蚀状态,年平均风蚀深度 30 cm 左右。

从图 2 可以看出,仪器设置后 20 个月内,流动沙丘迎风坡始终处于持续的风蚀过程,其变化曲线明显呈下降趋势,并在翌年 6 月风蚀深度达到最大值,以后进入植物生长季,并在反向风的影响下迎风坡风蚀过程变缓。

从迎风坡风蚀深度变化来看(图 2),4—11 月迎风坡处于风蚀期,风蚀深度从仪器设置初期(4 月)月均值的 4.37 cm 发展到月均值 22.92 cm(11 月),期间平均风蚀深度月均值为 15.72 cm。如果以 5 月风

蚀深度月均值(-10.78 cm)为基础,到冬季 12 月,累计风蚀深度月均值净增加值为 15.5 cm。而 12 月至翌年 5 月间是迎风坡最严重的风蚀时期,风蚀深度从月均值(12 月)26.3 cm 发展到月均值 74.48 cm,期间平均风蚀深度月均值为 52.77 cm。如果减去以前(11 月)的风蚀深度月均值变化值,12 月至翌年 5 月间流动沙丘迎风坡净风蚀深度月均值约为 29.85 cm。因此,在流动沙丘迎风坡如果不采取控制沙丘表面风蚀的沙障固沙措施,很难保证生物固沙技术的实施效果,或者说,如果进行无沙障措施造林(栽植深度 55~60 cm)后,经过 1 个冬季的风蚀过程,成活的苗木根系基本裸露在地表,很难继续保持成活生长状态,说明在流动沙丘迎风坡进行固沙造林时沙障是必需的技术措施。

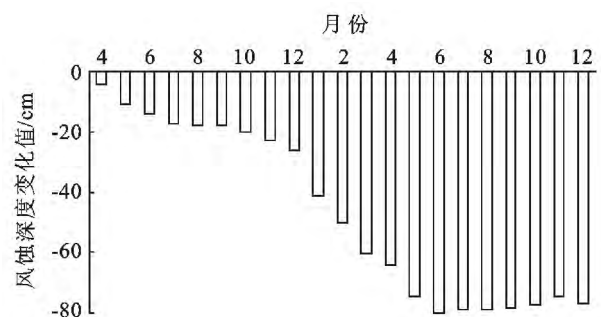


图 2 研究区迎风坡风蚀深度月均值的变化

从落沙坡积沙深度月均值变化曲线看(图 3), 年季间流动沙丘落沙坡基本是处于长期的积沙状态, 并随着年际间时间的延长, 落沙坡的积沙厚度也在持续的增加。也正是由于落沙坡的持续积沙, 最终导致了沙丘的前移堆积。

仪器设置初期(11 月)落沙坡积沙深度月均值为 43.1 cm, 到翌年 1 月份积沙深度月均值迅速增加到 107.22 cm, 以后积沙深度月均值缓慢增加, 4 月份月均值增加到 129.84 cm, 而后 5—10 月间, 积沙深度月均值基本保持在 171~185 cm 之间, 相对变化值 14 cm 左右, 而此时段(5—10 月)迎风坡风蚀深度变化在 -10.78~-20.01 cm 之间(图 2), 也相对平稳, 相对变化值 10 cm 左右。说明此时段内由于反向风的影响, 流动沙丘迎风坡风蚀、落沙坡积沙过程较弱。但是, 进入翌年 12 月份以后, 落沙坡积沙深度月均值急剧增加到 210 cm 以上, 并持续保持到下年度的 5—6 月, 其积沙深度月均值达到了 420 cm 左右。如果以翌年 12 月积沙深度月均值(246.84 cm)为基础, 期间(翌年 12 月至下年 6 月)积沙深度月均值净增加了 139.5 cm, 说明冬春季是落沙坡积沙强烈发生期, 也是沙丘前移的主要时期<sup>[2]</sup>。进入下年度的 6 月份以后, 由于反向风的作用或和因为落沙坡积沙堆积下移, 观测点位置积沙深度从 7 月的 400.82 cm 降低到 10 月的 317.07 cm, 这个过程也将导致沙丘脚前移。而后 11 月积沙深度又一次增加到 375.06 cm, 进入新一轮的周期变化。

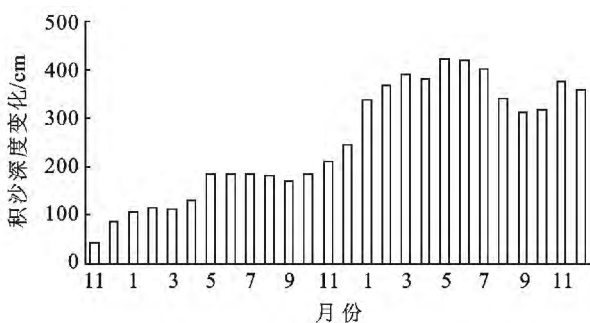


图 3 研究区落沙坡积沙深度月均值的变化

从流动沙丘顶部的积沙和风蚀过程看(图 4), 仪器设置初期(11 月至翌年 4 月), 流动沙丘顶部基本处于积沙状态, 以后(翌年 11 月)则处于持续风蚀过程, 但是, 到翌年 11 月后, 在前期风蚀基本上, 流动沙丘顶部又在进行着积沙过程, 并持续到第 3 年的 4 月份, 以后再次持续进行着风蚀过程。所以, 流动沙丘顶部的积沙风蚀基本特征是: 每年 11 月至翌年 4 月流动沙丘顶部进行着积沙过程, 每年 4—11 月流动沙丘顶部则进行着风蚀过程。

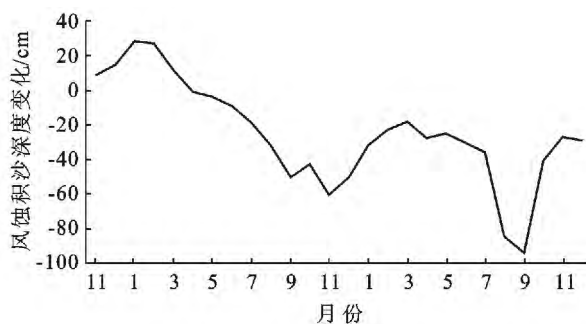


图 4 研究区沙丘顶部风蚀积沙深度月均值的变化

仪器设置初期(11 月至翌年 3 月间)流动沙丘顶平均积沙厚度变化值为 17.79 cm, 其中, 最大值发生在翌年 1—2 月, 平均积沙厚度变化值为 27.4 cm。而翌年 4 月份以后, 流动沙丘顶持续发生着风蚀过程, 平均风蚀深度变化值为 27.3 cm, 其中, 最大值发生在翌年 11 月, 风蚀深度变化值为 60.37 cm。此后, 流动沙丘顶再次进入积沙过程, 并形成新的变化周期。如果以翌年 11 月风蚀深度变化值(60.37 cm)为基础, 翌年 12 月流动沙丘顶积沙厚度变化值为 9.81 cm, 到第 3 年 3 月份流动沙丘顶积沙厚度变化值增加到 42.2 cm, 期间的平均变化值为 29.47 cm, 这个变化值上年度变化周期(翌年 4—11 月)流动沙丘顶平均风蚀深度变化值(27.3 cm)非常接近, 说明流动沙丘顶部的积沙和风蚀过程具有周期性变化特征, 并能够保持流动沙丘顶部高度的变化基本稳定。

### 3 讨论

风蚀积沙是风沙流作用流动沙地表面的一种自然过程。因此, 研究探讨风沙流运移规律不仅是防沙治沙的理论基础, 也是科学制定固沙技术措施的保证。而风力、沙量和下垫面是影响风沙流运移的 3 个要素, 其中, 风力是促进或制约风沙流流动的动力; 沙量的多少直接影响着风沙流的运移程度; 而下垫面对风沙流的影响则变得十分复杂。所以, 多数研究者侧重在风沙流结构及其下垫面的影响方面<sup>[3-6]</sup>, 而很少定量定位开展流动沙丘风蚀积沙变化特征方面的研究。周晓斯等<sup>[7]</sup>利用大涡模拟(LES)方法研究了新月形沙丘背风侧流场特性, 结果表明, 背风侧回流区内湍流强度总体上比回流区外大, 回流区内沙丘坡脚位置及重附点位置处湍流强度最大值出现在贴近地表附近; 回流区中部湍流强度最大值出现在回流区顶部, 随沙丘高度的增加先增大后基本不变。而本研究测定结果表明, 流动沙丘落沙坡(即背风侧)由于因旋涡作用, 风速急剧下降, 并随着起沙风速逐渐增加其积沙过程显著加强; 同时, 在沙丘顶部随起沙风速的

变化进行的积沙和风蚀过程具有周期性变化,并保持沙丘高度的基本稳定,即风蚀发生期平均风蚀深度变化值为 27.3 cm,积沙发生期平均变化值为 29.47 cm。此外,从流动沙丘不同部位风蚀积沙定量观测数据的变化看,在每年的春季,落沙坡明显处于积沙过程,迎风坡则为风蚀过程,而沙丘顶部也同样在春季进行着积沙过程(变化曲线升高),但从每年最终的变化结果看沙丘顶部的高度一直在进行着由高到低或由低到高的波动过程,因此沙丘一旦形成后,其整体高度基本保持在一定的水平,而不是持续的增加或降低。流动沙丘迎风坡多年风蚀深度的变化数据表明,迎风坡表面在不断的进行着风蚀,尽管每年都有一个较平稳的时期,但第二年在此基础上又进一步风蚀。根据观测数据,流动沙丘迎风坡年平均风蚀深度 30 cm 左右,因此,在流动沙丘迎风坡如果进行无沙障措施造林(栽植深度 55~60 cm)后,经过 1 个冬季的风蚀过程,成活的苗木根系基本裸露在地表,很难继续保持成活生长状态。如果采用 80~100 cm 沙柳插条<sup>[8]</sup>,甚至 120 cm 沙柳插条<sup>[9]</sup>的深栽造林技术则能够取得非常好的固沙造林效果。同样,在落沙坡则每年都在前一年积沙的基础上,又进行着同样的积沙过程,这一过程的原因一是沙丘顶部的积沙,导致沙丘脊线前移,使积沙不断埋在观测仪器上(仪器的观测点是不变的),另一原因是在落沙坡中的积沙不断进行着下移的堆积过程,导致仪器被沙埋,同时促进沙丘脚的前移,表现为沙丘的整体前移。从多年的积沙结果来看落沙坡主要是进行着持续的积沙过程。

#### 4 结论

(1) 风速对流动沙丘不同部位风蚀积沙特征变化具有重要影响。在落沙坡随着起沙风速逐渐增加其积沙过程显著加强,并在起沙风速下降时形成一个强烈的积沙时段。而迎风坡在起沙风速时处于最大的风蚀状态,并形成一个由强风蚀到弱风蚀的转变过程,但仍以风蚀过程为主。流动沙丘顶部在临近起沙

风速时处于风蚀过程,而当风速超过起沙风速并逐渐增大时,沙丘顶部是处于积沙过程,当风速由最大到逐渐降低,沙丘顶部进行着强烈的积沙过程,而当风速继续下降到临近起沙风速时,沙丘顶部又处在一个风蚀过程。

(2) 流动沙丘不同部位风蚀积沙程度存在明显差异。流动沙丘迎风坡始终处于持续的风蚀过程,其中,12月至翌年5月间净风蚀深度月均值约为 29.85 cm。落沙坡基本是处于长期的积沙状态,并且在 12月至翌年6月间积沙深度月均值净增加 139.5 cm,说明冬春季是落沙坡积沙强烈发生期,也是沙丘前移的主要时期。

(3) 流动沙丘顶部的积沙和风蚀过程具有周期性变化特征,即每年 3—11 月为风蚀发生期,平均风蚀深度变化值为 27.3 cm;12 月至翌年 3 月为积沙发生期,平均变化值为 29.47 cm。

#### [参 考 文 献]

- [1] 马玉明,姚洪林,王林和,等. 风沙运动学[M]. 内蒙古呼和浩特:远方出版社,2004.
- [2] 马玉明,姚洪林. 光电子集沙仪对毛乌素沙地沙丘蚀积过程的观测[J]. 中国沙漠,2001,21(10):68-72.
- [3] 王翔宇,朴东均,丁国栋,等. 流动沙丘风沙流结构的定量研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):36-40.
- [4] 徐军,章尧想,郝玉光,等. 乌兰布和沙漠流动沙丘风沙流结构的定量研究[J]. 中国农学通报,2013,29(19):62-66.
- [5] 张登山,石昊,魏殿生,等. 青海湖湖东人工治理沙丘风沙流结构特征[J]. 林业科学,2012,48(10):13-18.
- [6] 刘明义,戴全厚,张黎辉,等. 沙地土壤风蚀动力因子分析[J]. 中国水土保持,2000(7):28-30.
- [7] 周晓斯,王元,李志强. 小尺度新月形沙丘背风侧流场特性的大涡模拟分析[J]. 西安交通大学学报,2013,47(7):114-119.
- [8] 张天勇,任宏斌,李培贵,等. 流动沙丘迎风坡沙柳深栽造林技术研究[J]. 宁夏农林科技,2006,47(6):25-26.
- [9] 徐丽. 库布齐沙漠沙柳扦插技术研究[D]. 内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.