

河流冲积沉积沙地风蚀规律及植被防风蚀效应 ——以北京市永定河沙地为例

岳德鹏¹, 刘永兵², 王计平¹, 王冬梅³, 徐伟¹, 黄月艳⁴

(1. 北京林业大学省部共建森林资源培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 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; 3. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 4. 北京林业大学研究生院, 北京 100083)

摘要: 在河流冲积沉积沙地——永定河沙地演变研究的基础上, 选择耕地、荒草地、流动沙地、防护林带、片林、果园等永定河沙地典型的土地利用类型, 通过定位实验观测与数学定量分析, 进行沙地地表风沙活动与植被阻滞风沙规律研究。研究结果认为: 近地层风速随高度分布服从对数分布; 下垫面性质导致对应的摩擦速率大小不同; 不同利用类型下垫面对应的起沙风速明显不同; 0~20cm 高度范围内各层的输沙率百分含量随着高度的增加而减少, 两者呈负指数函数; 输沙率与风速呈正指数关系; 由于植被类型结构不同, 导致植被的防风、阻滞风沙效益在空间位置的不同; 积沙形态随林分结构呈现不同的分布规律。

关键词: 河流冲积沉积沙地; 永定河沙地; 风沙活动; 人工植被; 阻滞规律

文章编号: 1000-0933(2006)09-2948-09 中图分类号: Q14, S157.1, S718.1 文献标识码: A

Surface sand-laden wind movement on fluvial aggradations sandy land and use of vegetation in controlling sand-laden wind erosion in Yongding River of Beijing, China

YUE De-Peng¹, LIU Yong-Bing², WANG Ji-Ping¹, WANG Dong-Mei³, XU Wei¹, HUANG Yue-Yan⁴ (1. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry Univ., Beijing 100083, China; 2. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal Univ.; Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry Univ., Beijing 100083, China; 4. School of Graduate, Beijing Forestry Univ., Beijing 100083, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2948~2956.

Abstract: Wind erosion, which occurs in arid, semiarid and sub-humid areas, is a critical process in land desertification and soil degradation and causes a global environmental problem. Sand-laden wind is particularly an ecological, environment problem faced in Beijing and surrounding regions. Previous studies report the processes and mechanisms of wind erosion, such as sand moving characteristics, sand-laden wind blowing and impacts of wind erosion; contributing factors of wind erosion; blowing mode and pattern of sand-laden wind; the profiles of blown field and blown sand flux, soil erodibility, variation in sand-transporting ratio, and the mechanism of sand-preventing engineering.

Based on a previous study of evolution of fluvial aggradations sand, Yongding River sand land, we chose typical land-use types: field land, barren grasslands, drifting sand land, forest belt, pear orchard and patch forest, in which experiments were

基金项目: 国家“十五”科技攻关资助项目(2002BA517A14); 北京沙荒及风沙治理示范区建设资助项目(H020720110330); 国家林业局 948 引进资助项目(2004-4-42); 北京市自然基金重点资助项目(8011003)

收稿日期: 2006-03-03; **修订日期:** 2006-05-29

作者简介: 岳德鹏(1963~), 男, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治、景观生态和土地评价研究. E-mail: ydp_bj@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was supported by the national “Tenth-Five Year Plan” Key Program of Science and Technology (No. 2002BA517A14), Beijing Sand Desertification and Wind Sand Countermeasure Demonstration Area Project (No. H020720110330), “948” Program of the State Administration of Forestry (No. 2004-4-42), Key Project of Natural Science Foundation of Beijing (No. 8011003)

Received date: 2006-03-03; **Accepted date:** 2006-05-29

Biography: YUE De-Peng, Ph.D, Associate professor, mainly engaged in desertification control, landscape ecology and land evaluation. E-mail: ydp_bj@yahoo.com.cn

undertaken. Following close observations at selected sites and quantitative analysis, we studied the surface sand-laden wind movement and the possible measurements to control sand-laden wind by vegetation and plantation. The scenarios include: ① Observation of sand-laden wind blow at 0—20 cm of height; ② Observation of wind velocity gradients at different altitudes: 2.0 m, 1.5 m, 1.0 m, 0.5 m, and 0.2 m; ③ Observation of roughness at different ground covers; ④ Analysis of sand particle sizes at depths of 0—10 cm; ⑤ Evaluation of wind-breaking efficiency using different types of artificial vegetation; ⑥ Analysis of efficiency of preventing sand movement using different types of artificial vegetation.

Results of sand-laden wind movement experiments on different land uses showed that wind velocity of near-surface layer increased with altitudes, with the near ground wind velocity and altitude following the logarithm distribution. There were significant differences in friction velocities and thresholds of the wind speed in different land use types. A negative exponential relation existed between the sediment discharge percent and the altitudes (ranging from 0—20 cm). There was a significant exponential relation between sediment transport concentration and wind velocity. Experiments of wind breaking and sand preventing using artificial vegetation indicated that: ① Patch forest was the most effective when it is about 1—10 H from windward side, with a protective ratio of 22.0%; pear orchard was the most effective in 1—7 H from windward side, with a protective ratio of 68.8%; and forest belt was the most effective in 1—20 H from leeward side, with a protective ratio of 32.0%. ② The order of the three types of artificial vegetation on sand prevention was forest belt < patch forest < pear orchard. ③ Differences in compositions of vegetation led to the varying effectiveness of wind control and sand prevention using artificial vegetation associated with spatial structures and disparate distribution patterns of accumulated sand geometry.

Further study will consider the possible mechanisms of wind erosion of heterogeneous landscapes and interactions with a range of contributing factors that have not been examined.

Key words: fluvial aggradations sand; sand-laden wind movement; artificial vegetation; mechanisms of prevention and control

土壤风蚀是发生在干旱、半干旱及部分半湿润地区土地沙漠化、土地退化过程的首要环节,也是一个全球性的环境问题。土壤风蚀也是大气环境沙尘的主要来源之一,在近半个世纪以来土壤风蚀出现增加的趋势^[1,2]。土壤风蚀过程与风蚀机制的研究主要集中在以下几个方面:风沙两相流动力学特征及风蚀作用过程^[3];风蚀影响因素^[4,5];风沙运移方式^[3,5];风沙流结构^[6,8];植被防治措施;防护效益规律^[9-11]。然而对河流冲积沉积沙地的风蚀规律及其特征、沙地植被阻滞风沙效果、沙地植被与风沙相互间作用机理、如何进行风沙防治措施植被合理配置等研究的相对较少,而且一直是学术界研究的热点问题^[6,12,13]。植被作为风沙防治最有效、经济的治理措施,对区域土地沙化的防治有重要的理论和实践意义^[14]。本试验系统地研究了河流冲积沉积沙地异质景观风蚀特点及沙地人工植被防护效应,对于异质景观沙地的防治工作具有很好的理论基础与实践指导意义。

1 研究区域概况及沙地演化过程

1.1 研究区域概况

研究试验地位于北京市大兴区,属永定河洪积-冲积平原,为永定河沙地的典型地段。年平均气温11.5℃,多年平均降雨量为568.9 mm,降雨主要集中在7、8月份,占全年降雨量的65%左右。冬春两季干旱,风多且风速大,出现8m·s⁻¹的大风日平均每年23.3d,以西北风为主。土壤主要为风沙土,土壤结构差,有机质含量低,极易受到风蚀。由于开发历史悠久,在永定河沙地,人工植被占绝对优势,是区域经济和生态环境建设的主角,但是该沙地部分地段由于人类不合理的土地利用,在冬春季节风沙活动比较频繁。试验选择耕地、荒草地、流动沙地、防护林带、片林、果园等永定河沙地典型的土地利用类型,进行沙地地表风沙活动、植被抑制风沙规律与防护效益的研究。

1.2 沙地演化过程

永定河流域跨越我国地势的第二、三级阶梯,又横跨我国南温带半湿润、半干旱气候区和北温带半干旱气候区^[15]。属海河水系最大的一条支流,也是流经北京市境内最大的一条河流,于第四纪更新世(距今250万

年前至 115 万年前间) 后期形成。在漫长的地质年代里, 河水将上游流域因风化、崩塌、撞击而形成的碎石及流水侵蚀的泥砂搬运至下游, 在三家店出山后, 河道坡度陡缓, 河水流速骤减, 大量砾石和泥沙迅速沉积下来, 形成永定河冲积扇。随着永定河主流河道位置和流向的变迁, 永定河冲积扇在卢沟桥以下迅速发展形成广阔的永定河冲积扇, 海拔位于 50~55m, 地势平坦, 土壤肥沃, 河道密集, 是自古以来的重要农垦区^[15]。但是, 由于河流迁徙、易淤积, 第四纪以来受新构造运动的影响, 尤其是受 NW 向两组基岩断裂及大兴凸起的控制, 发生过 5 次大改道和 16 次摆动迁徙^[16]。从整个河道剖面分析, 在上游剖面的主要特点是岩性粗、沙泥比值高, 具有明显的正相序剖面特征; 沉积均是单层厚度向上变薄、粒度向上变细的正粒序沉积剖面, 底部具有明显的冲刷面和滞留层, 顶部发育细粒层^[17]。

2 研究方法

2.1 试验样地设置

本次试验观测时间为 2003~2005 年连续 3a 春季 3~5 月份, 试验样地布设在永定河右岸, 具体情况如下:

(1)耕地 耕地地势平缓, 有极少量玉米(*Zea mays*)留茬, 覆盖度在 2.5% 左右, 粗沙土占 80% 以上, 易旱、易涝、易风蚀、土壤养分低, 外围设有防护林网, 在冬春季节耕地地表裸露面积最大。在耕地分别布设面积为 2m×2m 的观测小区 3 个, 10 次测量取其平均值。

荒草地属未利用地, 属于该区域比较典型的土地利用类型。根据荒草地覆盖度, 将荒草地分为稀疏荒草地与荒草地两种类型。

(2)荒草地 该类型草地分布较广泛, 主要草种是狗尾草(*Setaria viridis*)、马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、虎尾草(*Chloris virgata*), 平均高度为 5~10cm, 分布比较均匀, 平均覆盖度在 26%~35% 之间。在荒草地上布设面积为 2m×2m 的观测小区 3 个, 10 次测量取其平均值。

(3)稀疏荒草地 在永定河沙地分布面积具有一定的代表性, 主要草种是狗尾草(*Setaria viridis*)、马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、虎尾草(*Chloris virgata*), 呈簇状分布, 平均高度为 5~10cm 覆盖度在 5%~12%。下垫面沙粒结构疏松, 部分沙地出现大小不等的风蚀破口, 受到人类活动影响严重。在荒草地上布设面积为 2m×2m 的观测小区 3 个, 10 次测量取其平均值。

(4)流动沙地 分布在永定河河道内, 沙面裸露, 沙地上有零散分布的狗尾草(*Setaria viridis*)、马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*), 平均高度在 5cm 左右, 平均覆盖度在 5% 以下。沙面沙粒流动性大, 有片状流沙, 部分地段出现了风蚀坑。平缓流动沙地上布设面积为 2m×2m 的观测小区 3 个, 10 次测量取其平均值。

(5)片林 树种为毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.), 长 240m, 宽 125m, 22 年生, 平均树高 18m, 株行距 4m×4m。林下平均枝高 2.7m, 地势平缓, 林分内地面覆盖物主要为狗尾草(*Setaria viridis*), 平均盖度 30%, 防风结构界于紧密结构与稀疏结构之间。

(6)林带 林带由毛白杨(*Populus tomentosa*)与刺槐(*Robinia pseudoacacia*)混交, 东西走向, 带长 500m, 林带宽 20m, 杨树株行距为 6m×6m, 平均胸径为 0.25m, 平均冠幅为 5.42m×4.58m, 平均树高 20m, 20 年生。刺槐株行距为 3m×4m, 刺槐平均胸径为 0.1m, 平均冠幅为 3.75m×3.3m, 平均树高 15m, 15 年生。整个林带平均枝下高 2.5m, 疏透度为 0.45, 属于稀疏结构。

(7)梨园 树种为黄金梨树(*Pernulo*)东西走向, 长 210m, 宽 140m, 12 年生, 平均树高 4m, 株行距 5m×5m, 平均冠幅 3m×3.2m, 平均胸径 0.15m, 平均枝下高 0.3m, 透风系数 0.6, 林分地下植被稀少。梨园的外围有一个防护林带, 树种为毛白杨, 株行距 6m×6m, 树高 19.6m, 平均枝下高 3.4m, 平均冠幅为 4.24m×4.93m。疏透度为 0.24, 属于紧密结构。

2.2 实验数据观测

(1)风沙流的观测 输沙量测定用集沙仪(0~20cm), 用 DEM-6 型三杯风速仪观测 2m 高度风速, 风速与输沙量同时进行。

(2) 风速梯度观测 实验小区中心沿垂直高度 2.0m、1.5m、1.0m、0.5m、0.2m 布设风速仪, 同时刻观测并记录风速, 50 次观测取其平均值。

(3) 沙粒粒径分析 土壤取样深度为 0~10cm, 采用筛析法分析。

(4) 防风效益风速观测 风速观测点布设在林带、梨园和片林走向的中垂线上, 林带在迎风面 10H、5H、3H、1H 处、背风面 1H、3H、5H、7H、10H、15H、20H 处; 梨园和片林距迎风面 1H、3H、5H、10H 处; (H 为树木平均高, 此处表示观测点的距离), 对照点风速观测点部布设在空旷的农田中心处。观测高度为 1m, 同时刻观测 10 次, 测量取其平均值。

(5) 阻沙量观测 采用插铁杆法, 负值表示风蚀量, 正值表示阻沙量, 零表示蚀阻平衡。沿林带、梨园和片林走向的中垂线上, 从它们的迎风面 10H 处开始, 每隔 4m 布点, 一直进入植被内部并且延伸到背风面 20H 处。在整个实验期间每一次大风的前后进行观测风积量。

(6) 防风效能计算 $E_{x1} = \frac{u_{01} - u_{x1}}{u_{01}} \times 100\%$ 式中, E_{x1} 是植被附近距离为 x 处、内高度为 1m 处防风效益, u_{01} 为观测点高度为 1m 处对照点的平均风速, u_{x1} 距林分 x 处、高 1m 处的平均风速。

(7) 疏透度计算 $\beta = \frac{a}{A} \times 100\%$ 式中, A 为林分林缘垂直面上的投影总面积, a 为总面积上透光空隙的面积。通过照相法获取各林分的相片后, 用图像处理软件进行处理, 计算各个林分在观测期的疏透度。

3 结果与分析

3.1 近地表风沙活动特征

3.1.1 近地面风速特征分析

(1) 风速垂直分布 从表 1 中看出, 近地面风速随着高度的增加而增加。表 2 得出风速随高度分布服从对数分布规律。在拟合方程中, 若把自变量看成是高度的常用对数, 这样拟合方程就看作是一元一次线性方程, 这个运动沙面上的风速分布方程仍然符合拜格诺^[11]提出的风速随高度分布式, $u = 5.75 \times u \times \lg \frac{Z}{Z_0} + u_0$ 每个方程的相关系数都是接近或大于 90%,

$$\lg \frac{Z}{Z_0} + u_0$$

这表示该回归方程更好地说明风速梯度变化与风速高度之间的关系。回归方程的斜率不同, 表示各个梯度风速变化比率不同。具体表现为, 在相同高度变化上, 不同下垫面, 对风速的影响程度也不同, 其降风比率大小次序是荒草地 > 稀疏荒草地 > 耕地 > 流动沙地, 本研究结果与山东禹城不同农田的风速梯度变化规律的研究成果相吻合^[18]。

表 2 不同下垫面类型近地层 2m 内风速与高度回归方程

Table 2 Regression equation between altitude and wind velocity of near-surface layer in different types of ground cover

下垫面类型 Ground cover type	回归曲线方程 Regression equation	相关系数 correlation coefficient
耕地 Arable land	$y = 0.9069 \ln(x) + 4.0224$	$R^2 = 0.9572$
稀疏荒草地 Sparse wild grass land	$y = 1.2375 \ln(x) + 6.542$	$R^2 = 0.901$
荒草地 Wild grass land	$y = 1.7913 \ln(x) + 5.6073$	$R^2 = 0.9971$
流动沙地 Drifting sand land	$y = 0.7294 \ln(x) + 5.1136$	$R^2 = 0.892$

(2) 摩阻速度分析 表 3 为近地层 2m 内不同高度摩阻速度对比表, 从中可以看出, 在近地面垂直高度 2m 内 4 种不同类型的摩阻速度整体平均值是荒草地最大, 其次是稀疏荒草地、耕地、流动沙地。主要是因为荒草地对地面气流层的摩擦作用增加了气流之间的内部摩擦, 导致地表对气流的阻力也增大, 而其它类型的下垫面对近地气流层的影响相对于荒草地较小, 其摩阻速度就较小。在近地层 0~2m 的垂直高度上, 各个类型的

摩阻速度变化趋势都是随着垂直高度的增加而增加。摩阻速度是造成土壤风蚀的最主要的基本原因之一,农林复合生态系统具有较高的防风效能,减少了物质的水平和垂直输送能力^[11]。因此在防治风蚀过程中通过改变下垫面性状,来降低近地面的摩阻速度^[18]。

表3 不同下垫面类型近地层2m内摩阻速度($m \cdot s^{-1}$)

Table 3 Friction wind velocity of near-surface layer in different types of ground cover

下垫面类型 Ground cover type	不同梯度风速摩阻速度 Friction wind velocity			
	2.0~1.5 m	1.5~1.0 m	1.0~0.5 m	0.5~0.2 m
耕地 Arable land	0.6960	0.4938	0.4622	0.2185
稀疏荒草地 Sparse wild grass land	1.0864	0.8352	0.7510	0.3933
荒草地 Wild grass land	0.6960	0.8889	0.7510	0.9178
流动沙地 Drifting sand land	0.6960	0.4938	0.2311	0.1748

3.1.2 近地面风沙流特征

(1)起沙风速 从表4可看出,在土壤含水率在1.0%~1.26%范围内,不同利用类型下垫面对应的起沙风速显著不同,起沙风速大小顺序为:荒草地>耕地>稀疏荒草地>流动沙地。其原因主要是荒草地有一定植被覆盖,对气流摩擦阻力增大,可以消耗气流部分能量。沙粒只有获得足够动量才摆脱静止状态开始运动,所以,荒草地(30%)的起沙风速为最大;耕地由于少量玉米残茬、外围防护林网的庇护作用以及土壤颗粒粘结力较大等原因,其起沙风速较小;稀疏荒草地起沙风速小于耕地;流动沙地表面裸露,缺少植被保护,沙粒结构松散,沙面极不稳定,抗风蚀作用最差,其起沙风速最大^[19]。

表4 不同土地利用类型起沙风速统计表

Table 4 Thresholds of wind velocity of different land-use types

下垫面类型 Ground cover type	2m高平均起动风速($m \cdot s^{-1}$) Threshold of wind velocity	沙粒粒径(mm) Sand particle size	0~10cm水分含量(%) Water content	起动情况 Incipient motion	
				Water content	Incipient motion
流动沙地 Drifting sand land	4.39	0.10~0.25	1.00		滚动
稀疏荒草地 Sparse wild grass land	4.91	0.10~0.25	1.10		滚动
耕地 Arable land	5.1	0.10~0.25	1.21		滚动
荒草地 Wild grass land	6.73	0.10~0.25	1.26		滚动

(2)输沙量随高度分布特征 从表5可以看出,各层相对输沙率是随着高度增加呈现减少的趋势,在相同高度不同下垫面的相对输沙率大小也是不同的,近地层风沙流在空间上分布不均匀,距近地面0~6cm高度内分布着了大部分风沙含量。在0~2cm内,流动沙地的输沙量占总输沙量的43.09%,而稀疏荒草地、耕地和荒草地的输沙量分别占总输沙量的43.10%、34.46%和37.40%,这说明风沙流是一个贴近地表的沙粒物质的搬运过程。由于下垫面性质的差异性,导致地表风沙流结构在0~20cm高度内的相对含量不同^[20]。因此采取防治措施改变下垫面层风沙流结构,就可削弱或减少风沙活动的强度,达到防治风沙危害的效果。

表6可以看出,4种近地面粉沙流在0~20cm内各层输沙量百分比与高度 $y(cm)$ 呈现负指数函数,相关系数都在90%以上,从理论也说明了输沙量的空间上的分异性规律^[13,20]。

表5 相同风速、不同下垫面近地面0~20cm风沙相对含量随高度的变化特征

Table 5 Characteristics of relative wind-sand contents in different types of ground cover to 0~20cm at the same velocity

高度(cm) Altitude	不同下垫面类型的相对输沙率(%) Relative rates of transporting sands in different types of ground cover			
	流动沙地 Drifting sand land	耕地 Arable land	稀疏荒草地 Sparse wild grass land	荒草地 Wild grass land
0~2	43.09	34.46	43.10	37.40
2~4	24.41	19.38	23.40	20.10
4~6	11.97	12.24	12.60	15.50
6~8	7.92	9.22	7.80	8.34
8~10	4.00	7.14	4.90	6.10
10~12	2.86	6.14	3.30	4.50
12~14	2.21	4.32	2.00	3.28
14~16	1.44	4.08	1.40	2.95
16~18	1.20	2.00	0.90	1.23
18~20	0.90	1.02	0.60	0.60

表 6 相同风速下不同下垫面 0~20cm 近地层含沙量(%)与高度回归方程

Table 6 Regression equation between 0~20 cm of altitudes and intensity sand flux in different types of ground cover at the same wind velocity

下垫面类型 Ground cover type	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
耕地 Arable land	$y = -13.494\ln(x) + 39.735$	$R^2 = 0.95$
稀疏荒草 Sparse wild grass land	$y = -17.827\ln(x) + 49.282$	$R^2 = 0.922$
荒草地 Wild grass land	$y = -4.7158\ln(x) + 18.905$	$R^2 = 0.9738$
流动沙地 Drifting sand land	$y = -17.872\ln(x) + 49.383$	$R^2 = 0.9129$

(3) 风速与输沙率关系 表 7 可以看出, 输沙率都随着风速的增加而增加, 输沙率与风速之间呈显著的指数关系。不同下垫面层的性质不同, 导致输沙率的增长幅度也是不同的。当风速从 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 流动沙地输沙率对于风速变化反映较快, 输沙率增长 1.0932 倍, 耕地增加 0.9370 倍, 稀疏荒草地增加 0.8477 倍, 荒草地增加 0.8419 倍。荒草地输沙率增加的比率最小, 这说明植被的防护作用, 能够很好的抑制风沙流中输沙率的增大^[13, 20]。

3.2 植被阻滞风沙作用

3.2.1 人工植被类型的防风效益 表 8 可知, 风速观测高度为 1m 时, 迎风面 1H 处到林缘 10H 范围内梨园的防风效能为 12%; 在林内距迎风林缘 1~7H 范围内的防风效能为 68.8%; 在背风面 1~20H 范围内的防风效能为 23.6%。由于梨园的树冠大且密集, 透风系数较小, 树枝下高很低, 观测期间梨树正是开花期, 枝叶花较多, 形成紧密结构。风经过梨园近地面时, 树冠、枝叶对风的摩阻作用, 消耗了风的大部分能量, 仅有少量的风通过林内, 显著地减低了风速; 另一部分风受到梨园的阻挡被迫抬升, 在林冠上层表现出对近地表面风速显著的减弱作用。

表 8 梨园防风效能

Table 8 Wind-breaking efficiency of pear orchard ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

对照点风速 Open velocity	迎风面距迎风缘风速 Wind velocity windward				防风效能 Protective efficiency				林内距迎风林缘风速 Velocity in pear orchard				防风效能 Protective efficiency				背风面距背风缘风速 Wind velocity leeward				防风效能 Protective efficiency			
	1H*	3H	5H	10H	(%)	1H	3H	5H	7H	(%)	1H	3H	5H	7H	10H	15H	20H	(%)						
	3.3	2.5	2.9	3	3.5	12	0.9	1.1	1.2	1	68.8	1.7	1.8	2.2	2.7	2.9	3.2	3.3	23.6					

* H: 树平均高 Anediageheight of trees; 下同 the same below

表 9 可知, 风速观测高度为 1m 时, 迎风面距迎风缘 1~10H 范围内梨园的防风效能为 19.3%, 在背风面距背风缘 1~20H 范围内的防风效能为 32%。一方面林带属于稀疏结构, 风虽然受到林带的阻挡和摩擦作用, 但是大部分气流不改变运行方向, 均匀穿过林带, 在运行过程中逐渐消耗了能量, 致使风速降低。另外林带树干 2.5m 以下修枝强度较大, 导致林带断面的疏透度增加, 因此林带背风面风速减低缓慢, 最低风速出现在林带背风面 3~7H 范围内。

从表 10 可知, 风速观测高度为 1m 时, 迎风面距迎风缘 1~10H 范围内梨园的防风效能为 22%; 在林内距迎风缘 1~7H 范围内的防风效能为 53%; 在背风面距背风缘 1~20H 范围内的防风效能为 28.2%。从片林结构特点来看, 片林介于紧密结构与稀疏结构之间。此外, 片林的面积大, 并且片林高度(20m)较高有效防护范围较大, 能够产生连续的防护效应。

从表 8、表 9 和表 10 可知, 3 种植被不同部位其平均防风效能明显不同。这主要是由植被的结构特征不同所引起的。对其降低风速进行比较, 在迎风面距迎风缘 1~10H 范围内片林的防风效能最大为 22%; 在林内距迎风林缘 1~7H 范围内梨园防风效能最大为 68.8%; 在背风距背风缘 1~20H 范围内林带防风效能最大

表 7 不同下垫面风速与输沙率关系

Table 7 Relation between wind velocity and intensity of sand flux in different types of ground cover

下垫面类型 Ground cover type	回归关系 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient
耕地 Arable land	$y = 8 \times 10^6 x^{4.9614}$	$R^2 = 0.946$
稀疏荒草 Sparse wild grass land	$y = 7 \times 10^6 x^{4.6842}$	$R^2 = 0.886$
荒草地 Wild grass land	$y = 4 \times 10^6 x^{4.67}$	$R^2 = 0.966$
流动沙地 Drifting sand land	$y = 7 \times 10^6 x^{5.6326}$	$R^2 = 0.9767$

为 32%。

表 9 林带防风效能

Table 9 Wind-breaking efficiency of forest belt ($m \cdot s^{-1}$)

对照点风速 Open velocity	迎风面距迎风缘风速 Wind velocity windward				防风效能 Protective efficiency (%)		背风面距背风缘风速 Wind velocity leeward						防风效能 Protective efficiency (%)		
	1H	3H	5H	10H			1H	3H	5H	7H	10H	15H	20H		
	4.28	3.1	3.4	3.5	3.8	19.3		2.8	1.9	2.5	2.6	3.3	3.5	3.7	32

表 10 片林防风效能

Table 10 Wind-breaking efficiency of patch forest ($m \cdot s^{-1}$)

对照点风速 Open velocity	迎风面距迎风缘风速 Wind velocity windward				防风效能 Protective efficiency (%)		林内距迎风林缘风速 Velocity in forest				防风效能 Protective efficiency (%)		背风面距背风缘风速 Wind velocity leeward						防风效能 Protective efficiency (%)		
	1H	3H	5H	10H			1H	3H	5H	7H			1H	3H	5H	7H	10H	15H	20H		
	3.8	2.6	2.7	3	3.4	22		2.2	2.1	1.6	1.2	53		1.2	2	2.3	2.4	2.6	2.8	3.6	28.2

3.2.2 人工植被类型的阻滞风沙效益 图 1~图 3 和表 11 的观测结果可知,在梨园迎风面 3H 处开始出现有积沙,越靠近林缘,阻沙量越大,并且在林缘前出现最大沉积量,占总沉积量的 60.4%。在梨园内部直到 5H 处林内的积沙量逐渐减少为零,其积沙量占总阻沙量的 39.6%,林内与林外的积沙量呈现不均匀分布。在林带的迎风面 1H 处开始出现沉降且沉降量仅占总量的 6.9%,越靠近林带积沙量呈增加的趋势,在林带的背风面 3H 处积沙量最大,占总量的 82.3%左右,说明林带的阻沙的风沙沉积量主要是分布在林带迎风面和背风面两个区域中,且林带背风面的阻沙量最大。片林在迎风面 1H 处开始出现阻沙现象,迎风面 1~10H 范围内沉降量约占总沉积量的 12.9%,而且越接近林缘沉积量越大。进入林缘内部 1H 的范围内出现沉降量最大的区域。在片林内部距林缘 1~8H 的范围内,积沙量的分布随着风速的降低也逐步减低,占总量的 87%,说明片林阻沙量的风沙沉积分布范围较大,主要分布在片林内部。另外片林树干以及地面有一部分枯落物和杂草的机械阻滞作用,也会使吹来的风沙流急剧沉降。

表 11 不同植被类型阻沙效益

Table 11 Sand-preventing efficiency by different types of vegetation

植被类型 Vegetation type	迎风面占 Windward		林内占总量 Inward (%)	背风面占 Leeward (%)	平均阻沙量 Amount of sand prevented (mm/m^2)
	总量 Windward	总量 Inward (%)			
梨园 Pear orchard	60.4	39.6	—	—	3.6
片林 Patch forest	12.9	87.1	—	—	2.8
林带 Forest belt	6.9	10.8	82.3	1.9	1.9

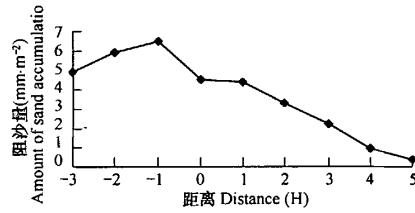


图 1 梨园阻沙量分布特征

Fig. 1 Distribution of sand accumulation in pear orchard

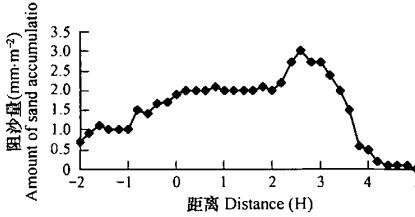


图 2 林带阻沙量分布特征

Fig. 2 Distribution of sand accumulation in forest belt

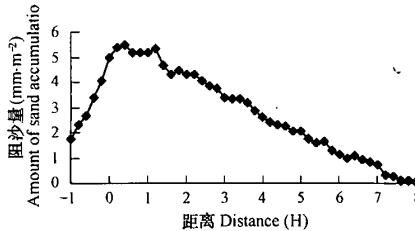


图 3 片林阻沙量分布特征

Fig. 3 Distribution of sand accumulation in patch forest

3 种人工植被的阻沙效益大小次序为:梨园 > 片林 > 林带。明显可以看出 3 种植被的阻沙效能大小完全不同,说明植被类型不同对应的阻沙性能也不同。这与植被的类型,结构和防风性能有密切的关系。各植被

阻沙效率的大小与观测范围内的防风效能大小的次序一致。

4 结论与讨论

(1)近地层风速随着高度的增加而增加,风速随高度服从对数分布规律;若把自变量看成是高度的常用对数,这样拟合方程就看作是一元一次线性方程;就方程的斜率而言,不同下垫面降风比率大小次序是荒草地>稀疏荒草地>耕地>流动沙地;不同下垫面性质导致对应的摩阻速度大小不同。

(2)土壤含水率在1.1%~2.93%范围内,不同利用类型下垫面对应的起沙风速明显不同,起沙风速大小顺序为:荒草地>耕地>稀疏荒草地>流动沙地;0~20cm高度范围内各层的输沙率百分含量随着高度的增加而减少,两者呈负指数函数;输沙率与风速呈正指数函数,不同下垫面层的性质不同会导致输沙率的增长比率差异显著。

(3)片林在迎风面距迎风林缘1~10H范围内防风效能最大为22%;梨园在林内距迎风缘1~7H范围内防风效能最大为68.8%;林带在背风面背风缘1~20H范围内防风效能最大为32%。

(4)梨园平均阻沙量最大、片林次之、林带最小。积沙分布特征不同,梨园积沙量主要集中在迎风面0~3H内;片林在迎风面1H至林内距迎风林缘1H处;林带在迎风面1H至背风面3H内,说明植被类型结构不同,导致植被的防风、阻滞风沙效益在空间位置的不同;积沙形态随林分结构呈现不同的分布规律。

(5)本试验选择永定河河流冲积沉积沙地,研究了该地区异质景观(由农田、沙荒地、草地、果园、林地组成)中农田、沙荒地、草地、果园、林地等不同土地利用类型的风蚀规律与不同类型人工植被的防风蚀效益。但还需要从更大尺度上,把农田、沙荒地、草地、果园、林地等组成的异质景观作为整体进行风蚀规律与防风蚀效益的进一步研究。

References:

- [1] Gomesa L, Arrubé J L, Lo'pez M V. Wind Erosion in a Semi-arid Agricultural Area of Spain: the WELSONS project. *Catena*, 2003, (52): 235~256.
- [2] Baker W, Cai Y. There Programs for Multiscale Analysis of Landscape Structure Using the GRA SS Geographical Information System. *Landscape Ecology*, 1992, 7 (4): 291~302.
- [3] Dirk Goossens, Jens Gross. Similarities and Dissimilarities Between the Dynamics of Sand and Dust During Wind Erosion of Loamy Sandy Soil. *Catena*, 2002 (47): 26~289.
- [4] Dong Z B. Research Achievements in Aeolian Physics in China for the Last Five Decades(I), *Journal of Desert Research*, 2005, (3): 293~305.
- [5] Chen W N, Dong Z B, Li Z S, et al. Wind Tunnel Test of the Influence of Moisture on the Erodibility of Loessial Sandy Loam Soil by Wind. *Journal of Arid Environments*, 1996, 34: 391~402.
- [6] Feng R L, Li Y Z, Hua Z, et al. Wind Erosion and Airborne Dust Deposition in Farmland during Spring in the Horqin Sandy Land of Eastern Inner Mongolia, China. *Soil & Tillage Research*, 2004, (75): 21~130.
- [7] Butterfield G R. Transitional Behavior of Saltation: Wind Tunnel Observations of Unsteady Wind. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39: 377~394.
- [8] Wang H T, Dong Z B, Zhang X H. A Study of the Particle Concentration in the Sand Flux-a Wind Tunnel Investigation. *Advances in Earth Science*, 2004, 19 (5): 732~735.
- [9] Liu Y P, Gao Y. Tunnel Experiment on Mechanism of Shelterbelt Reducing Sand and Dust near Ground Surface. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 162~165.
- [10] Zhu C Y, Ding G D, Yang M Y. *Sandstorm Physics*. Beijing: Chinese Forestry Publishing Press, 1992.
- [11] Meng P S, Zhao M, Zhang J S. A Study on Dustproof Effect of Agroforestry System, *Forest Research*, 1998, 34(2): 11~16.
- [12] Huang F X, Wang M X, Wang Y S. Recent Progress on the Research of Vegetation Protection Soil Erosion by Wind. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (6): 627~633.
- [13] Huang F X, Niu H S, Wang M X, et al. The Relationship Between Vegetation Cover and Sand Transport Flux at Mu Us Sandland. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 700~710.
- [14] Liu Y B, Yue D P, Wang X D. Physical Principle of Wind Erosion in Sand Land Countermeasures —— A Case Study of Daxing District in Southern Beijing. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1): 32~34.
- [15] Beijing recode, water. Beijing: Beijing Publishing Press, 2000.
- [16] Hao P Z, Yang L Z. Study on Development and Comprehensive Regulation of the Mouth of Yongdingxinhe River, *Journal of Waterway and Harbour*, 2001

21(4):160~163.

- [17] Liao B F, Zhang W M, Li L, et al. Study on Modern Deposit of a Braided Stream and Facies model —— Taking the Yongding River as an example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1):34~39.
- [18] Zhang X Y. Preliminary Study on the Erosion Amount of Soil and Wind-Sand Movement on Surface of Farmland in Shahe. *Arid Zone Research*, 1996, 13(1):76~80.
- [19] Zhang X Y. Preliminary Studies on the Wind Erosion in the Early Period of Agricultural Development in Sand Area, *Arid Zone Research*, 1995, 12(1):26~32.
- [20] Wang J, Hu Z M. The Different Response of the configuration of the Sand Blown by Wind to the Different Ration of the vegetation Coverage on the Near Ground Surface. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(5):30~33.

参考文献:

- [4] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I), 中国沙漠, 2005, 25(3): 293~305.
- [8] 王洪涛, 董治宝, 张晓航. 风沙流中沙粒浓度分布的实验研究, 地球科学进展, 2004, 19(5): 732~735.
- [9] 刘艳萍, 高永. 防护林降解近地表沙降尘机理的研究, 水土保持学报, 2003, 17(1): 162~165.
- [10] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [11] 孟平, 宋兆民, 张尽松, 等. 农林复合系统防尘效应的研究. 林业科学, 1998, 34(2): 11~16.
- [12] 黄富祥, 王明星, 王跃思, 等. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展, 植物生态学报, 2002, 26(5): 627~633.
- [13] 黄富祥, 牛海山, 等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系模型, 地理学报, 2001, 56(6): 700~710.
- [14] 刘永兵, 岳德鹏, 王晓东. 北京南郊沙地风蚀物理特征及防护对策研究——以大兴区为例, 水土保持学报, 2005, 19(1): 32~34.
- [15] 北京志·水利志. 北京: 北京出版社, 2000.
- [16] 郝品正, 杨连众. 永定新河河口演变及综合治理研究, 2001 21(4):160~163.
- [17] 廖保方, 张为民, 等. 辨河状现代沉积研究与相模式——中国永定河剖析. 沉积学报, 1998, 16(1):34~39.
- [18] 张小由. 沙河农田地表风沙运动与土壤风蚀的初步研究. 干旱区研究, 1996, 13(1):76~80.
- [19] 张小由. 沙地农业开发利用早期土壤风蚀的初步研究——以山东禹城为例, 干旱区研究, 1995, 12(1):26~32.
- [20] 汪季, 胡志敏. 近地表风沙流结构对不同植被覆盖度的相应, 干旱区资源与环境, 2005, 19(5):30~33.