灌木林盖度对风沙土风蚀作用的影响

郭雨华 ,赵廷宁 ,丁国栋 ,孙保平
(北京林业大学水土保持学院 ,北京　100083)

摘　要:通过野外实地调查和定位观测 ,系统研究了灌木林盖度对风沙土风蚀的影响。结果表明:临界侵蚀风速与灌木林盖度之间为非线性正相关关系;风速廓线受灌木林盖度的影响显著;风蚀率随灌木林盖度的减少呈指数增加;灌木林盖度、气流场特征及风蚀性质之间存在着较好的对应关系;空气动力学粗糙度及零风速平面位移高度均与灌木林盖度之间呈幂函数关系。

关键词:盖度;风速廓线;风蚀率;空气动力学粗糙度
中图分类号:S157　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005-3409(2006)05-0245-03

Influence of Shrub Coverage on the Wind Erosion of Sandy Soil

GUO Yu-hua , ZHAO Ting-ning ,DING Guo-dong ,SUN Bao-ping
(*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract:Through field investigation and observation, the influences of shrub coverage on soil erosion by wind were systematically studied. The result indicated that threshold wind velocity of soil erosion is non-linearly and positively related to shrub coverage;and the wind profile is influenced remarkably by shrub coverage;wind erosion rate increases exponentially with the coverage reduction;there exists power relationship between aerodynamic roughness length and shrub coverage,as well as displacement height.

Key words:coverage;wind profile;wind erosion rate;aerodynamic roughness length

在沙地环境中 ,植被能够有效降低风速、减轻土壤风蚀 ,从而减少地表土壤细微颗粒及养分的损失[1,2]。植被的这种防风抗蚀生态效应一直是国内外有关学者关注和研究的焦点。已有的研究结果表明:植被主要通过覆盖地表、增加下垫面粗糙度和拦截运动的沙粒 3 种生态过程来缓解气流对地表的侵蚀作用;植被对气流的影响主要反映在地表粗糙度和摩阻速度的改变上;而植被对风蚀的影响则直接表现在地表风蚀率的变化上 ,其影响程度主要取决于植被的盖度、高度等[3,4]。目前 ,关于植被影响风蚀的研究主要集中于对乔木(主要是针对农田防护林)的防风作用[5,6]或局限于室内的模拟试验[7] ,而对灌木林的防风抗蚀作用的野外观测研究尚不多见。本文以地处距首都北京最近的风沙源——河北省丰宁满族自治县小坝子乡风沙区为研究区域 ,以当地典型代表性植被红柳(*Tama rixramosissima* Ldb.)灌丛实验片林为研究对象 ,通过对红柳灌木林不同盖度下的风速及风沙活动特征进行的野外定位观测 ,分析了灌木林盖度对地表风速、风蚀状况及空气动力学参数等影响。该研究有助于深入了解灌木在退化沙地生态系统恢复、重建中的生态过程、地位和作用 ,并将为干旱、半干旱沙漠地区林草植被的恢复和重建提供理论依据。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区自然概况

研究区位于河北省丰宁满族自治县小坝子乡 ,其隶属冀北接坝山区 ,地理坐标北纬 41°22′8″～41°34′6″,东经 116°12′49″～116°29′30″,土地总面积 31 002 hm^2。小坝子乡喇嘛山口沙区距首都北京的直线距离仅 110 km ,该地区又是滦河、潮白河的发源地 ,是京津地区的重要水源[8]。该区属于大陆性季风型半干旱气候 ,年平均降水量 478 mm ,年均无霜期 105 d ,年平均气温为 4 ℃左右 ,年 4 级以上风日数 210 d 左右 ,其中 8 级以上大风的日数最高可达 65 d。地带性植被为温带落叶阔叶林 ,北部坝上地区呈干草原景观 ,小坝子乡境内多为原始森林破坏后经过封育或天然更新发展起来的次生林 ,辅以人工林和经济林。主要林种有油松(*Pinas. tabulaeformis* Carr.)河北杨(*Populus hopeiensis*)山杏(*prunus armeniacavar.* ansumarim)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等 ,灌木以锦鸡儿(*Cavagana microphylla*)、酸枣(*Z. acidojujubaC.* Ychenget M. J. Liu)、红柳(*Tama rixramosissima* Ldb.)、等为主 ,草本植物以冰草(*Agropyron cristatum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、羊草(*Leymus chinesis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等为主。河谷盆地多人工栽培的杨、柳(*salixbabyloaica* L)、榆(*U. pumila* L.)等。土壤以棕壤为主 ,褐土、潮土为辅 ,以北梁为中心到小坝子村以及河谷滩地 ,分布有风沙土。

1.2　研究方法

本研究主要针对冀北接坝山地多风向条件下灌木林盖度对风速、风蚀率及空气动力学粗糙度等参数的影响进行的野外实地调查和定位观测 , 观测时间为 2005 年 3 月下旬到

* **收稿日期**:2005-12-23
基金项目:科技部首都圈防沙治沙应急技术示范与研究——燕山丘陵山地(河北丰宁)防沙治沙技术示范区项目(FS2000 - 004)资助
作者简介:郭雨华(1982 -) ,男 ,湖北荆州人 ,硕士研究生 ,主要研究方向:水土保持与荒漠化防治;责任作者:赵廷宁(1962 -) ,男 ,博士 ,教授 ,主要从事水土保持与荒漠化防治研究工作。

5 月上旬,正值风沙活动频繁期。在实验区的沙质土地上,样地土壤类型为风沙土,选择当地典型代表性植被红柳(*Tama rixramosissima* Ldb.)灌丛实验片林为研究对象,选择不同盖度的红柳灌木林样地,样地面积均为 5 m ×5 m,红柳灌木林分布形式基本上为均匀分布,红柳的平均高度均约为 90 cm。利用中科院寒旱所研制的十通道自记风速仪、AVM - 03 型手持风速仪相结合观测风速。在各个样方内设置固定观测点,首先利用风速仪测定不同灌木林盖度的临界侵蚀风速,然后测定高度分别为 25 cm、50 cm、90 cm、120 cm、150 cm 等高度处的风速,同时观测空旷裸沙 200 cm 高度处的风速为对照。风速观测间隔时间为 2 s,每次观测时间 40 min。在同时同地的条件下,利用阶梯状集沙仪收集不同下垫面 0～20 cm 气流层内的输沙量,单位是 g/ min 。

2 结果与分析

2.1 灌木林盖度对临界侵蚀风速的影响

由实验结果(图 1)可见,临界侵蚀风速随植被盖度的增大而增大。这是由于植被盖度的增大,空气动力学粗糙度增大,对风的扰动作用增大,地剪切力相应增大,进而提高了临界侵蚀风速。相关分析表明,植被盖度(VC)与临界侵蚀风速(U_0)之间为非线性正相关关系,最佳相关关系式为:

$$U_0 = 3.8057e^{0.0134VC} \qquad R^2 = 0.985\,4 \qquad (1)$$

二者的非线性函数关系表明,灌木林盖度的增大对提高地表抗风蚀能力具有重要意义。

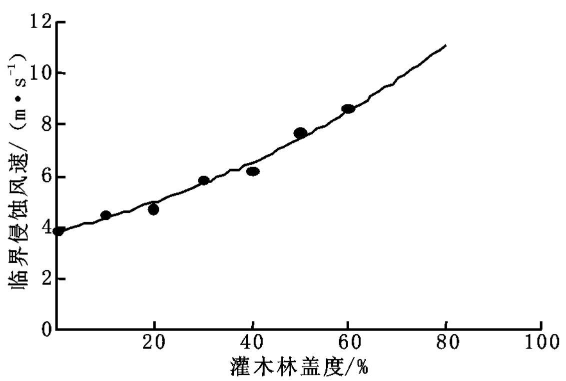

图 1 灌木林盖度与临界侵蚀风速的关系

2.2 灌木林盖度对风速廓线的影响

风速随高度的变化称为风速廓线。风速廓线决定风施于地面的切应力或拖曳力的大小。故风速廓线在风蚀动力学研究中具有十分重要的意义。风速廓线因地表状况而异。大量的研究表明,光滑地表之上的风速随高度变化遵循对数规律[9],并可用下式表示:

$$U_z = (U_* / K)\mathrm{Ln}(Z / Z_0) \qquad Z \geq Z_0 \qquad (2)$$

式中:U_z ——高度 Z 处的水平风速;U_* ——摩阻速度;K ——比例系数;Z_0 ——水平风速为零的高度,用于衡量地表的粗糙状况,称为空气动力学粗糙度(Roughness Length)。

为了探讨灌木林对风速廓线的影响,作者测定了灌木林盖度 10 %、20 %、30 %、40 %,观测高度分别为 25 cm、50 cm、90 cm、120 cm、150 cm 五个高度上的风速(表 1)。

由观测结果可以看出,除了光滑地表,既无植被存在的条件下,风速随高度变化遵循对数规律外,在其余条件下,由于植被的存在,破坏了地面之上一定高度内的上述规律。当观测高度小于灌木林高度时,风速受植物单体的影响十分明显,风速廓线随灌木林盖度的变化十分杂乱。而当观测高度超过灌木林高度时,风速廓线随灌木林盖度的变化呈现出有规律的变化。据此,由于植被的存在,大气边界层可明显分为粗糙亚层和惯性亚层两个亚层[10]。约以灌木高度为界,下层为粗糙亚层,气流受灌木单体的影响强烈,风速变化复杂,风速廓线随灌木林盖度的变化呈现明显的随机性特征;上层为惯性亚层,气流受灌木单体的影响微弱,风速变化主要受制于整个灌木林的盖度,风速廓线随灌木林盖度变化呈现有规律的变化。

表 1 不同灌木林盖度下的风速廓线测定结果

a. 裸地 2 m 高风速为 7.92 m/ s

灌木林盖度	不同高度上的风速/ (m ·s-1)				
/ %	25 cm	50 cm	90 cm	120 cm	150 cm
40	2.74	3.42	3.59	4.77	5.38
30	3.07	3.06	4.06	5.46	5.78
20	2.98	3.37	4.52	5.59	6.18
10	3.36	3.52	4.98	6.12	6.43

b. 裸地 2 m 高风速为 9.97 m/ s

灌木林盖度	不同高度上的风速/ (m ·s-1)				
/ %	25 cm	50 cm	90 cm	120 cm	150 cm
40	3.41	3.84	4.22	5.46	6.27
30	3.62	4.12	4.49	5.94	6.34
20	4.04	4.86	5.17	6.42	7.02
10	4.37	5.21	6.07	7.33	7.82

c. 裸地 2 m 高风速为 11.25 m/ s

灌木林盖度	不同高度上的风速/ (m ·s-1)				
/ %	25 cm	50 cm	90 cm	120 cm	150 cm
40	4.31	4.41	5.02	6.14	7.86
30	4.87	5.17	5.42	6.82	7.58
20	4.24	5.64	5.87	6.87	7.96
10	4.91	6.44	6.88	8.34	8.96

气流受植被的影响被迫抬升,风速廓线将相应地发生位移,把原来在裸露地面上的零风速平面高度(Z_0)向上抬升一个位移量 d[11]。由表 1 可知,在同一高度上,风速随着灌木林盖度的增大而减小,而且盖度越大,风速等值线越高。这说明灌木林盖度越大,零风速平面被迫抬升的高度越大。

分析表 2 可知,当裸地 2 m 高处平均风速为 9.71 m/ s 时,灌木林各盖度下不同高度处的平均相对风速(各高度平均风速与裸地 2 m 高处平均风速的百分比)如下表 2。

表 2 灌木林盖度对风速的影响

灌木林盖度	不同高度上的风速/ (m ·s-1)				
/ %	25 cm	50 cm	90 cm	120 cm	150 cm
40	35.94	40.06	44.08	56.23	66.94
30	39.65	42.43	47.99	62.51	68.59
20	38.62	47.58	53.45	64.78	72.61
10	43.36	52.11	61.59	74.77	83.01

表 2 清楚地反映了灌木林盖度对风速的影响。在灌木林冠层内(观测高度约 90 cm 以下),气流受植物单体的影响强烈,随着灌木林盖度的增大,风速显著减小。盖度 10 %、观测高度 50 cm 处相对于裸地 2 m 高处的平均风速减少 47.89 % ,同高度处,在盖度 20 %、30 %、40 %下,平均风速分别减少 52.42 %、57.57 %、59.94 % 。观测高度 120 cm 处,在 10 %、20 %、30 %、40 %的盖度下,平均风速分别减少 25.23 %、35.22 %、37.49 %、43.77 % 。这表明通过增大灌木林盖度来降低近地表风速,效果非常显著。内蒙古林学院通过对各种灌木林测定,当灌木林盖度大于 30 %时,一般能

降低风速 40 %以上[12] ,与本文测定结果相近。

2.3　灌木林盖度对风蚀率的影响

在防止土壤风蚀的实践中,植被盖度是人们最关心和最具实践意义的特征参数。作者测定了灌木林不同盖度下的风蚀率(E) ,结果如下表 3:

表 3　不同灌木林盖度下的风蚀率(风速为 8.77m/ s)

灌木林盖度/ %	风蚀现象	风蚀率 E / (g ·min⁻¹)
40	沙质地表上风向边缘有弱风蚀,有弱风沙流产生	22.52
30	沙质地表自始自终有风蚀,有明显风沙流产生	51.23
20	较严重风蚀,有较强风沙流产生	64.74
10	强烈风蚀,有强烈风沙流产生	138.33
0	强烈风蚀,下风向明显较强,有强烈风沙流产生	231.45

分析表 3 中的实验结果可知,风蚀率(E) 与灌木林盖度(VC) 之间具有如下相关关系:

$$E = 232.68e^{-0.0565VC} \qquad R^2 = 0.9807 \qquad (3)$$

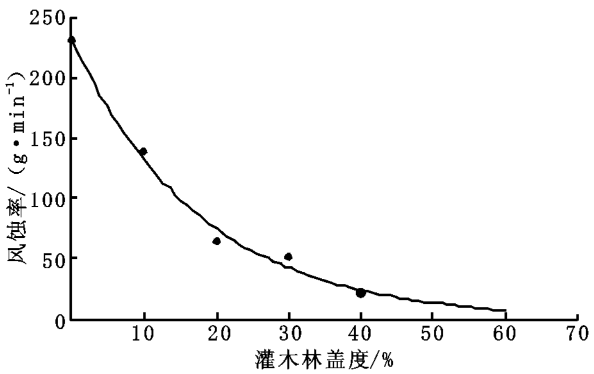

图 2　灌木林盖度与风蚀率的关系

由相关关系可以看出,风蚀率随灌木林盖度的增大呈指数减少(图 2) 。在风速 8.77 m/ s 的条件下,灌木林盖度在 40 %左右时,风蚀率很小。随着盖度的减少,风蚀率开始缓慢增加。当盖度减少至 20 %左右时,风蚀率突然增加,这一趋势一直维持到植被消失。灌木林盖度小于 20 %时风蚀率的突然增加与风沙流侵蚀密切相关。中国科学院兰州沙漠研究所董光荣等的研究结果表明,在同一风速下,挟沙气流(风沙流) 与不挟沙气流(净风) 作用于同一粉沙质壤土或固定风沙土引起的风蚀量差别极为明显,前者是后者的 4.36～5.24 倍[13] 。与本文结论相似。

2.4　灌木林盖度、气流场特征及风蚀性质的关系

Ash 和 Wasson 的观测结果表明[14] ,在植物周围,以及植物之间的风场可以分为植物覆盖区、植物后部微风区、下方向尾流区、两侧加速区以及植物间未受影响区等 5 个区域。当植物盖度较小时,植物周围的上述 5 个区域发育比较完整,此时气流称为单独粗糙流,当植被进一步增大,各植物个体周围形成的上述 5 个区域,尤其是尾流区相互联结,此时气流称为尾流干流。植物盖度进一步增大到一定程度时,植物间会出现程度不同的涡流,此时的气流称为敷涂气流。作者通过野外实地观测,当灌木林盖度小于 20 %时,有强烈风沙流产生,风蚀以强烈的风沙流侵蚀为主,此时气流形式应为单独粗糙流;当灌木林盖度为 20 %～30 %时,有明显风沙流产生,风蚀兼有净风侵蚀和风沙流侵蚀,此时气流形式应为尾流相干流;当灌木林盖度大于 30 %时,沙质地表上风向边缘只有弱风蚀,有弱风沙流产生,风蚀以净风侵蚀为主,此时气流形式应为敷涂流。

上述分析说明,在灌木林盖度变化过程中,气流场特征及风蚀性质之间存在着较好的辩证统一关系,因此,增加地面植被盖度,保护就地地表,是降低风的侵蚀性最有效的途径[12] 。同时,还应阻止上风向沙源、减弱风沙流侵蚀[3] 。

2.5　灌木林盖度对空气动力学粗糙度的影响

空气动力学粗糙度 用于衡量地表的粗糙状况,可按下式计算:

$$Z_0 = \mathrm{EXP}[U_1 \ln Z_2 - U_2 \ln Z_1 / (U_2 - U_1)] \qquad (4)$$

式中: U_2、U_3 分别为两个高度上的风速。因此,计算的关键是观测高度的选择和风速的测定。由前文的分析可知,在作者观测的五个高度中,50～150 cm 间的风速廓线的变化可以代表整个灌木层的特征。因此,为了探讨粗糙度与灌木林盖度的关系,本文选择了 90 cm、150 cm 两个观测高度来计算粗糙度(表 4) 。

表 4　灌木林不同盖度下的粗糙度及位移高度的计算结果

灌木林盖度/ %	粗　糙　度/ cm			平均粗糙度/ cm	位移高度 / cm
40	5.5216	5.2095	4.8745	5.2019	5.1907
30	3.7389	3.4752	3.1750	3.4630	3.4607
20	2.5108	2.3206	2.2852	2.3722	2.3699
10	1.1490	1.1067	1.3207	1.1845	1.1822

根据表 4 计算出的 Z_0 可知,空气动力学粗糙度 Z_0 与灌木林盖度 VC 之间为非线性正相关关系,最佳相关关系式为:

$$Z_0 = 0.1053 VC^{1.0436} \qquad R^2 = 0.9948 \qquad (5)$$

空气动力学粗糙度 Z_0 随盖度 VC 的增加呈幂函数增加。

当地表无植被存在,即比较平滑时, Z_0 很小,非常接近地表。随着灌木林盖度的增加,粗糙度 Z_0 相应地增大。设增大后的粗糙度为 Z_0^* ,风速阈线将相应地发生位移,把原来在裸露地面上的零风速平面向上抬升一个位移高度 $d = Z_0^*$ 。根据以上分析,位移高度 d 可以反映灌木林对风力作用以至土壤风蚀的影响。由公式(4) 可知:

$$d = \mathrm{EXP}[U_1 \ln Z_2 - U_2 \ln Z_1 / (U_2 - U_1)] - Z_0 \qquad (6)$$

式中: Z_0 ——为光滑地表的空气动力学粗糙度,测定值为 0.002 26 cm。d ——的计算结果见表 5 。

进一步分析,得出位移高度 d 与灌木林盖度 VC 的相关关系式为:

$$Z_0 = 0.1051 VC^{1.0438} \qquad R^2 = 0.995 \qquad (7)$$

3　结论与讨论

风沙活动期间,灌木林盖度由小到大的有序变化对地表风况、风蚀率及空气动力学粗糙度的影响很大,决定系数在 0.98 以上。其中临界侵蚀风速 与灌木林盖度 VC 之间为非线性正相关关系,关系式为: $U_0 = 3.8057e^{0.0134VC}$ ($R^2 = 0.9854$) ;灌木林盖度对风速廓线的影响显著,风速随盖度增大而减小,研究结果与内蒙古林学院对各种灌木林的测定结果相近[12] ;风蚀率 E 与灌木林盖度 VC 之间为非线性负相关关系,关系式为: $E = 232.68e^{-0.0565VC}$ ($R^2 = 0.9807$) ;灌木林盖度、气流场特征、风蚀性质之间存在着内在联系;空气动力学粗糙度 Z_0 及零风速平面的位移高度 d 均随灌木林盖度的增加呈幂函数数关系。

本研究采用野外观测数据得出的相关关系式在形式上与以往风洞模拟实验[3,7] 结果略有不同,但都揭示了植被抑制风蚀、扼制沙漠化效应的生态机理,即增大植物盖度可以增大空气动力学粗糙度,从而增大气流作用于地表时所遇到的阻力,缓解气流对地表的侵蚀作用,减少土壤风蚀率,最终实现对地表的保护作用。

(下转第 251 页)

分组成。投入包括肥料、种子、劳力。产出是指玉米、玉米秸秆、李、金荞麦、黄花菜的收入。其经济效益分析的结果见(表10)。

尽管今年玉米价格有所增加,但肥料等生产资料价格也在增加,单纯种植玉米的收入还是比较低,农民习惯种植玉米纯收入为3 246元/ hm^2,横坡种植和人工梯化配合平衡施肥提高了玉米产量,纯收入较农民习惯提高45.10%～45.75%。经济植物篱技术种植玉米,或者既提高了玉米产量,同时经济植物篱价格高;或者玉米产量虽然有所下降,但经济植物篱产量高,价格也高。如:黄花菜、李的价格都为2.00元/ kg,较玉米的1.40元/ kg,增加42.86%。

经济植物篱处理的纯收入大大高于其它3个处理,经济植物篱纯收入校农民习惯增加8 546元/ hm^2～8 628元/ hm^2,增长263.28%～265.70%。

3　结　论

(1)地表径流与降雨量成一定正相关关系,土壤侵蚀量却不一定与降水量成正相关系,它还与地表覆盖度有关。在降水集中的月份,尤其要重视采取经济植物篱等拦截,阻挡水土流失,同时要重视促进作物生长,增大地表覆盖度,有效防治水土流失。

(2)在土壤肥力低下的坡耕地上,采取经济植物篱和工程梯化水保措施结合平衡施肥,可明显防治水土流失,其减少地表径流和土壤侵蚀作用从大到小顺序为:黄花菜+平衡施肥>金荞麦+李树+平衡施肥>工程梯化+平衡施肥>横坡种植+平衡施肥>农民习惯。

表10　经济效益分析　　元/ hm^2

		工程梯化	黄花菜	金十李	农民	横坡种植
投入	肥料	1985	1985	1985	2085	2363
	种子	302	302	302	360	360
	劳力	140	155	360	140	140
	总投入	2427	2442	2647	2585	2863
收入	玉米籽粒	6815	8421	4631	5538	7172
	玉米秸秆	322	523	295	293	422
	黄花菜	0	5370	0	0	0
	金十李	0	0	7875	0	0
	金荞麦	0	0	1638	0	0
总收入		7137	14314	14439	5831	7594
纯收入		4710	11872	11792	3246	4731
纯收入较农民习惯/ %		45.10	265.74	263.28	—	45.75
产投比		2.94	5.86	5.45	2.26	2.65

注:有机肥0.05元/ kg,过磷酸钙0.24元/ kg,氯化钾1.00元/ kg/ kg,石灰0.05元/ kg,玉米1.40元/ kg,玉米秸秆0.2元/ kg,黄花菜2.00元/ kg,尿素1.75元/ kg,李2.00元/ kg,金荞麦0.20元/ kg。

(3)从增加农民收入来看,经济植物篱技术配合平衡施肥明显高于横坡种植、工程梯化配合平衡施肥和农民习惯种植。

(4)因此坡地农业的可持续发展,必须水保措施和平衡施肥相结合,走果-粮-草-畜产业结构调整的道路。试验再一次证明,经济植物篱配合平衡施肥可维护坡耕地的可持续利用。

参考文献:

[1] 陈旭晖,孙秋,扬林,等.中国贵州省山区综合农业发展研究[M].贵阳.贵州科技出版社,1994.

[2] 汪芬,蔡恩水,肖化仁.贵州省土壤[M].贵阳.贵州科技出版社,1994.

[3] 张建华,等.川中丘陵坡耕地水土保持与农业生产的发展[J].水土保持学报,2001,15(1):81-84.

[4] 张建国,等.红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):81-84.

(上接第247页)

参考文献:

[1] Skidmore E L,Powers D H. Dry soil-aggregate stability:energy-based index[J]. Soil Sci Soc. Am.J.,1982,46:1274-1278.

[2] 张华,李锋瑞,张铜会,等.春季裸露沙质农田土壤风蚀量及变异特征[J].水土保持学报,2002,16(1):29-32.

[3] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996,16(4):442-446.

[4] Bressolier C,Thomas Yves-F. Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes[J].Journal of sedimentary petrology,1979,47(1):331-338.

[5] Oosterhoorn M,Kappelle M. Vegetation structure and composition along an interior-edge-exterior gradient in a Costa Rican montane cloud forest[J]. Forest Ecology and Management,2000,126:291-307.

[6] Wang H. Study on the effects of construction in windbreak and sand fixation system in Jingtai irrigated area[J]. Journal of Gansu Agricultural University,1997,32(3):238-243.

[7] Yu X Z,Qu B S,Shen X D. Wind tunnel simulation of sheltering effect of shelterbelts on sand[J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control,1991,5(4):46-52.

[8] 丰宁县水利局.丰宁水利志[M].保定:团结出版社,1995.12.

[9] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen,1941.

[10] Lee J A. The role of desert shrub size and spacing on wind profile parameters[J]. Physical Geography, 1991,12(1):72.

[11] 吴正,等.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2003.

[12] 孙保平.荒漠化防治工程学[M].北京:中国林业出版社,2000.

[13] 董光荣,李长治,金炯,等.关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J].科学通报,1987,32(4):297.

[14] Wasson R J. Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surface[J]. Earth Surface Surface Processes and Landforms,1986,11(4):505.

[15] 张春来,邹学勇,董光荣,等.植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J].水土保持学报,2003,17(3):31-33.

[16] 董治宝,陈渭南,李振山,等.植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):1-8.