

干旱区防护林空间配置模式及成本效益分析

冯泽深,高甲荣,赵哲光,贺康宁,李 柏

(北京林业大学,教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083)

摘 要:测定研究了3种不同配置格局沙柳林的风速廓线梯度,得出行带式配置防风效果最好,均匀式次之,随机式最差。通过实地观测近地表输沙率和地表粗糙度,计算行带式配置中不同规格沙柳林的防护成本效益。结果表明:一行一带、带高1.5 m、带距7.5 m、插深0.5 m配置规格的行带式沙柳林防护成本效益最好,但限于15倍带高以内;行数一定的情况下,防护林带越高,防护成本效益越大。

关键词:灌木林;配置模式;风速廓线;防护成本效益

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0269-06

我国北方干旱、半干旱地区由于降水稀少而风力强盛,植被只能发育成疏林和稀疏的灌丛,不能完全固定流沙和阻止风沙流的形成,土壤风蚀问题严重。研究表明,低植被覆盖度时,防护林的水平配置格局成为制约土壤风蚀的重要因素^[1-4]。我们在长期的实际观测中发现,当植被覆盖度低于40%时,灌木林的水平空间分布格局差异常严重改变风力流场结构,从而影响低覆盖度灌木林的防风固沙效果。如何设计灌木林的空间配置模式,使低覆盖度灌木林既能达到防风固沙的最大效果,又能取得最大防护成本效益,是目前急需解决的重要问题。目前,我国学者在防护林空间配置格局方面作了较多的工作,贺大良等^[5]开展原状土样风蚀物理过程的风洞模拟实验,结果表明植被对地表风蚀的抑制作用与植被覆盖度有关,并对主要风蚀因子之间的关系作了定量和半定量的研究。杨文斌等^[6]以柠条灌木丛为例,针对低植被覆盖度沙面三种配置格局的防风效果进行了模拟风洞试验,得出两行一带配置模式是非常优秀的低覆盖度固沙植被,但未涉及材料成本的问题。凌裕泉等^[7]得分析了植株的分布形式对输沙量的影响,认为低密度植株的多列分布较高密度植株单列分布对风沙更具有减弱作用,植株的规则分布优于随机分布,但其实验是在低速风洞中进行的,需要进行野外实地观测来验证。高永等^[8]在内蒙古伊克昭盟的防沙治沙区研究了不同规格沙柳沙障方格内的防风固沙成本效益,认为方格沙障的规格越小防护效果越好,但并未确定最佳的防护成本效益。本文以宁夏盐池县风沙区人工沙柳灌木林为研究对象,在理论建立风速轮廓线表达式的基础

上,通过野外实地观测不同种沙柳林配置格局的防风固沙效果,比较各种配置模式的防护成本效益,得出最适宜当地的最佳防护林配置格局,以期对沙区营建灌木固沙林提供依据。

1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,地理坐标北纬37°04′~38°10′,东经106°30′~107°41′,属陕、甘、宁、蒙4省(区)交界地带,总面积7 130 km²。盐池县北部与毛乌素沙地相连,地貌类型复杂,地形起伏较大,土地类型以滩地、平地、缓坡地、丘陵地、沙丘地为主^[9]。由于受季风影响,该地区气候干燥,降水量少,多年平均降水量280 mm,蒸发量为降雨量的5~7倍,全年太阳辐射总量为140 kJ/cm²。

在盐池沙地,主要的灌木建群种有沙柳、柠条、怪柳、杨柴和沙蒿等。其中,人工林尤以沙柳、柠条在沙地分布面积最广。沙柳属串根性植物,在沙地中生长旺盛,繁殖较快,3 a生沙柳根幅便可达400 m²左右,最浅根系分布在地下5 cm,具有较强的抗旱能力和较大的生态幅度,并且具有良好的经济价值,是固沙造林的理想植物。本次试验时间是在4月初,大多数沙柳枝叶还没有展开,而这时风力对地表的影响最为严重,研究此时沙柳林水平分布格局对土壤风蚀的影响具有十分重要的意义。

2 材料与方法

2.1 试验材料

本试验选取当地两年生沙柳,通过随机、均匀、行带3种水平配置格局以及行带式配置中完全无缺

收稿日期:2009-11-24

基金项目:国际科技合作项目(2008DFA32270);国家自然科学基金资助项目(40771128)

作者简介:冯泽深(1985—),女,重庆人,博士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: fengweibc@126.com。

通讯作者:高甲荣(1963—),博士,副教授,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: jiaronggao@sohu.com。

口的 1 行、2 行、3 行沙柳人工灌木林配置模式, 计算其防护成本效益。

2.2 实验设计

2.2.1 均匀式配置 选取的样地位于盐池县官滩村, 面积在 4 hm^2 以上, 主风向以西北风为主, 沙柳平均株高 $60 \sim 80 \text{ cm}$, 下垫面为半固定沙地, 有少量草本植物(样地内已清除), 其灌丛间的距离及测点布置见图 1, 共布置了 22 个测点; 灌丛外布置了 1 个测点, 尽量选在无植被影响、地势高的空旷地带。由于考虑到 PC-2F 型多通道自计式遥测风速风向仪 1 次只能测 10 个点, 故采用固定某一点(旷野处那一点)不动, 每次测 8 个点, 测定 3 轮。同时对 2 个高度(20 cm 和 50 cm)的风速进行观测。

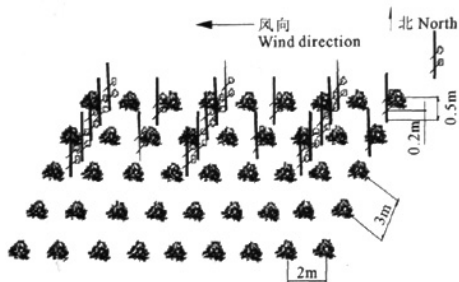


图 1 均匀式沙柳风速观测布置

Fig.1 Layout of equal-spacing shrub communities

另外, 在样地内选取 20 、 40 、 60 、 80 、 100 、 120 、 180 cm 和 200 cm 八个高度同时进行风速廓线观测, 间隔时间 1 s , 观测 17 min 。

2.2.2 随机式配置 样地选取地点同均匀式, 选了 $35 \text{ m} \times 35 \text{ m}$ 的样方, 主风向以西北风为主, 沙柳平均株高 $60 \sim 80 \text{ cm}$, 下垫面为半固定沙地, 有少量草本植物(样地内以清除), 共布置了 22 个测点, 测点布置如图 2。灌丛外在上风方向布置了 1 个测点, 尽量选在无植被影响的空旷地带。测定方法与测定高度同均匀式配置。同样在样地内进行风速廓线观测。

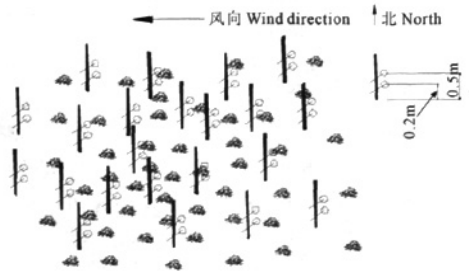


图 2 随机式沙柳风速观测布置

Fig.2 Layout of random shrub communities

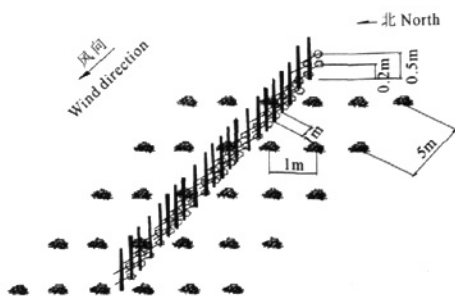


图 3 行带式沙柳风速观测布置

Fig.3 Layout of belts shrub communities

2.2.3 行带式配置 样带选取地点同均匀式, 共选择了 5 条林带, 带宽 5 m , 株距 1 m , 株高在 60 cm 左右, 测点布置图如 3, 共布置了 19 个测点, 林带前布置了两个测点, 尽量选在无植被影响的空旷地带, 以后的 17 个测点每隔 1 m 布置 1 个。由于考虑到仪器 1 次只能测 10 个点, 故采用固定某一点(旷野处最远的那一点)不动, 测完前 10 个点后将其余 9 个点移到下一轮进行观测。

测定高度同均匀式配置。同样在样地内进行风速廓线观测。

2.2.4 行带式不同配置规格 将试验地选择在一块坡度约 20° 的大面积平缓流动沙丘上。在沙丘迎风坡中部分别设置 3 组带状防护林, 用人工插条的方式把沙柳插进沙土中, 插入沙中深度 $30 \sim 50 \text{ cm}$, 防护林的走向与主风方向(NNW)垂直。为了尽可能减少边界效应, 设置每带防护林长度为 50 m [10]。

I 组: 防护林平均高度 0.5 m , 分为 1 行、2 行、3 行等不同规格, 行距 0.5 m , 插深 0.3 m 。

II 组: 防护林平均高度 1 m , 分为 1 行、2 行、3 行等不同规格, 行距 1 m , 插深 0.4 m 。

III 组: 防护林平均高度 1.5 m , 分为 1 行、2 行、3 行等不同规格, 行距 1.5 m , 插深 0.5 m 。

在试验区设置 HOBO 小型自动气象站(H21-001 数据采集器)。在每组防护林后一倍带高处、3 倍带高处、5 倍带高处、7 倍带高处、10 倍带高处、15 倍带高处和旷野分别布设风杯, 风杯高度为 0.5 m 和 2 m 。连续观测, 记录每 5 min 平均风速, 每 5 min 自动记录 1 次。

3 结果与分析

3.1 风沙流运动数学模型

在净风条件下, 当地表有植被覆盖时, 湍流边界层中的风速分布仍服从对数定律, 即:

$$u_z = \frac{u_d}{k} \ln \left[\frac{z-d}{Z_0} \right] \tag{1}$$

式中, u_z 为高度 z 处的风速, u_d 为定床摩阻流速, d 为有效表面粗糙度, 其物理意义为地表之上零风速高度上移高度; Z_0 为有植被覆盖的地表粗糙度。

当风中挟带沙颗粒时, 有植被覆盖的地表上, 风沙流边界自地表而上可以分为内外两层, 内边界层为跃移边界层, 外边界层为含沙可忽略的悬移层^[11]。在跃移边界层中, 沙颗粒与气流之间能发生复杂的动量传输, 而外边界层中这种作用极其微弱, 可以忽略不计。假定整个风沙边界层为纯剪切边界层, 且气压梯度为零, 建立风速轮廓线的数学模型。设外边界层的高度为 ϵ , 湍流层位于高度区间 $[h, \epsilon]$ 之中, 描述该区间的动量方程可以写为

$$\frac{d}{dz} \left[\rho_a l^2 \left| \frac{du(z)}{dz} \right| \frac{du(z)}{dz} \right] = 0 \tag{2}$$

式中, ρ_a 为空气密度, $l = k_z$ 为混合长, $k = 0.4$ 为卡门常数。

外边界层 ϵ 高处 的风速可用下式计算,

$$u(\epsilon) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{\epsilon}{z_0} \tag{3}$$

式中, u_* 为外边界层的剪切风速, 由跃移边界层中 风沙颗粒的阻力和地表阻力共同所致; z_0 为外边界 层风速轮廓线的空气动力学粗糙度。其中 z_0 计算公 式为

$$z_0 = h \exp \left[- \frac{k_u(h)}{u_*} \right] \tag{4}$$

将(3) 式积分即可以得到描述风沙流边界层的 控制方程:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \tag{5}$$

3.2 不同配置格局防风效应分析

通过对试验地的连续观测, 观测时段内确保没 有风沙流产生, 测得 1 000 组数据, 对同一高度风速 进行平均, 然后将其转化成相同时刻的风速, 再进行 拟合分析, 结果见表 1。根据表 1 做出平均风速相 对应的风速廓线^[12], 得到三种配置方式下不同高度 与相应平均风速的对应关系, 符合(5)式中推导出的 对数相关关系(图 4)。

植物的三种配置模式中, 不同高度对应的风沙 流平均速度大小依次为随机式 > 均匀式 > 行带式, 即行带式配置防护林带内风沙流速度最低(表 1)。

表 1 不同高度平均风速
Table 1 Average wind velocity at different heights

配置方式 Spatial pattern	项目 Items	风速 Wind velocity (m/s)							
		20cm	40cm	60cm	80cm	100cm	120cm	180cm	200cm
随机式 Random	平均 Average	4.416	4.791	5.321	6.412	6.917	7.285	8.248	8.232
	最大值 Max.	7.562	7.983	8.854	11.214	11.926	12.314	13.268	13.672
	最小值 Min.	1.621	1.866	1.332	1.897	1.227	2.671	2.714	2.946
均匀式 Equalspacing	平均 Average	3.3647	3.8203	4.797	5.7683	6.3673	6.904	7.7873	7.998
	最大值 Max.	5.701	5.839	7.046	8.607	10.286	9.871	12.194	12.867
	最小值 Min.	1.169	1.401	1.523	2.173	1.239	2.627	2.805	2.899
行带式 Belt	平均 Average	2.9087	3.5943	3.9083	4.152	4.286	4.3897	4.8207	4.7807
	最大值 Max.	4.046	7.854	7.805	8.175	8.626	8.672	9.285	9.376
	最小值 Min.	0.745	0.925	1.001	1.763	1.875	1.913	1.906	1.817

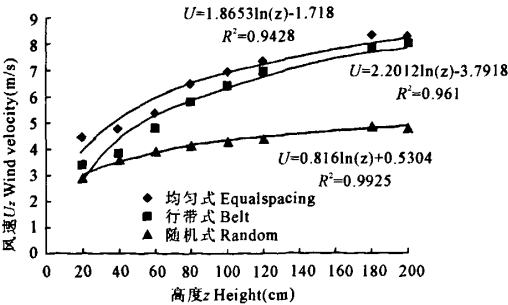


图 4 三种配置方式不同高度风速廓线图
Fig.4 Wind velocity profiles of three spatial patterns of shelterbelt at various heights

由图 4 可以看出, 3 种防护林配置方式中, 风沙 流的风速廓线均呈现为上凸的曲线, 这说明发生跃 移的颗粒在被风加速的过程中, 与床面发生碰撞, 击 溅起其它颗粒进行跃移, 使得跃移运动的连锁反应 能够产生并维持下去, 同时也将一部分能量转移到 地表颗粒上, 使之进行蠕移运动。但风场仅是维持 风沙流的能量来源, 在随后的跃移过程中, 由于能量 逐渐耗散, 高处的风速轮廓线逐渐逼近直线, 即跃移 层上部的风速分布仍然遵循(5)式所表示的对数函 数关系。三种不同配置格局防护林的风速廓线中, 行带式配置的廓线斜率最大, 为 2.2012, 即风速变 化最剧烈, 而随机式配置的廓线斜率最小, 为 0.816,

是行带式的 37.1%,说明行带式林带内风速降低最大,随机式风速降低最小,均匀式林带居中,即行带式配置防护林带防风固沙效果最佳。

3.3 不同规格行带式配置防护林的成本效益分析

防护林的行带式水平分布能直接影响防护林的防护效果。相同高度的防护林,随着行数的增加,防护林的防护效益增加,但防护林的成本也在增加。如何能寻找一种最佳配置,使防护林发挥出最大的成本效益,是需要我们解决的问题。

$$\text{设定 } k = (1 - \frac{u_i}{u}) \times 100\% \quad (6)$$

其中, u_i 为防护林后不同位置 0.5 m 高处风速; u 为

旷野 0.5 m 高处风速; k 为防护林减弱风速的百分比。 k 值越大说明防风效果越佳,越小说明防风效果越弱。由图 5 可以看出,不同规格防护林对风速的减弱有所不同:在相同带高的情况下,三行一带的防护林防风效应比两行一带的和一行一带的防风效应好。在五倍带高以内,各种规格的防护林都能使风速降低 20% 以上,而带高 1 m 和 1.5 m 的三行一带的防护林在 7 倍带高处也可使风速降低接近 20%。随着与林带距离的加大,各点的防风效应在逐渐减弱,如距林带 1 h 处 k 的最大值是 37.89%,最小值是 25.98%;距离林带 15 h 处 k 的最大值是 5.41%,最小值是 1.08%。

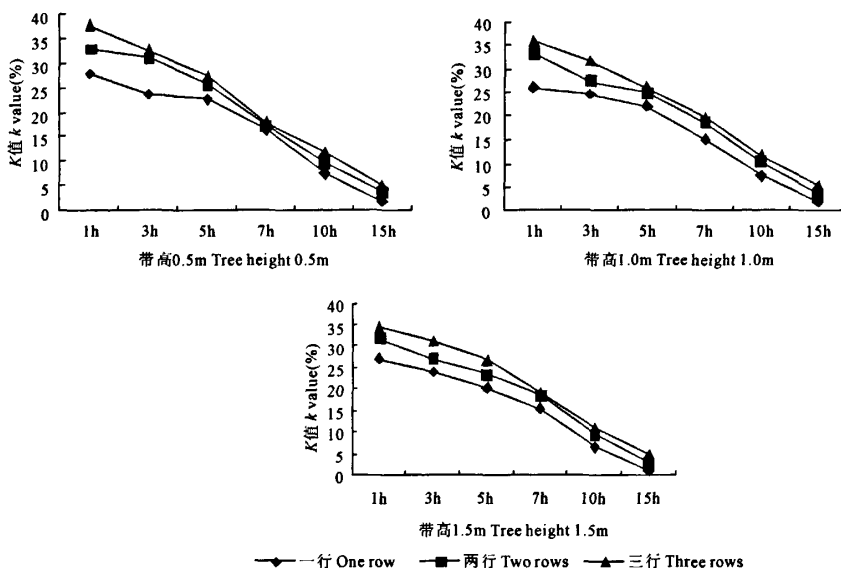


图 5 不同规格防护林不同位置 K 值

Fig.5 K values behind various shelterbelt sizes

风沙流可以直接威胁到地面,推动沙丘前进、后退,随风向的变化往复式移动,因而输沙率可以用来判断地表的蚀积状况,掌握风成地貌的形态发育及演变规律^[13]。不同空间配置格局的沙柳防护林可以不同程度地减少近地表输沙率^[14]。由图 6 可以看出,在带高一定的情况下,三行一带的配置格局在减少近地表输沙率上要优于两行一带和一行一带的配置格局。在带后 5 倍带高距离处,每种规格的防护林都可以使输沙率减少 50% 以上。随着与林带距离的加大,地表输沙率在增大,到 15 倍带高处,不管防护林配置格局如何,输沙率均接近于旷野输沙率,说明每种防护林的防护作用都达不到 15 倍带高以外。

沙柳防护林的高度、形状、大小直接影响其防风

固沙效果,但为其所投入的成本却需要考虑,从而达到成本低、效益高的良性防护林体系。我们利用沙柳的防护距离除以所用沙柳总高度来计算不同规格沙柳防护林的成本效益(即防护效益与成本比)^[8,9]。选择出不同规格沙柳防护林的最大防护距离,且该距离内防风效果同时应满足减少地表风速 20% (或接近) 以上、粗糙度为旷野的 100 倍(或接近)以上、输沙率为旷野的 50% (或接近) 以下 3 个条件^[15]。分析图 5 与图 6 的数据可以得出,符合条件的有带高 0.5 m 处的不同规格的 5 倍带高处(行距 0.5 m),带高 1 m (行距 1.0 m) 和带高 1.5 m (行距 1.5 m) 的一行和两行的 5 倍带高处,带高 1 m (行距 1.0 m) 和带高 1.5 m (行距 1.5 m) 的三行的 7 倍带高处。设防护林的高度为 h ,行数为 n ($n = 1, 2, 3$),最

大防护距离为 $m \times h$ ($m = 1, 3, 5, 7$), 沙柳插入沙子下面的深度为 d 。则不同规格沙柳防护林的成本效益 D 为

$$D = \frac{(m \times h + n \times h - h)}{n(h + d)} \quad (7)$$

由(7)式计算出不同规格沙柳防护林的成本效益, 结果见图 7。

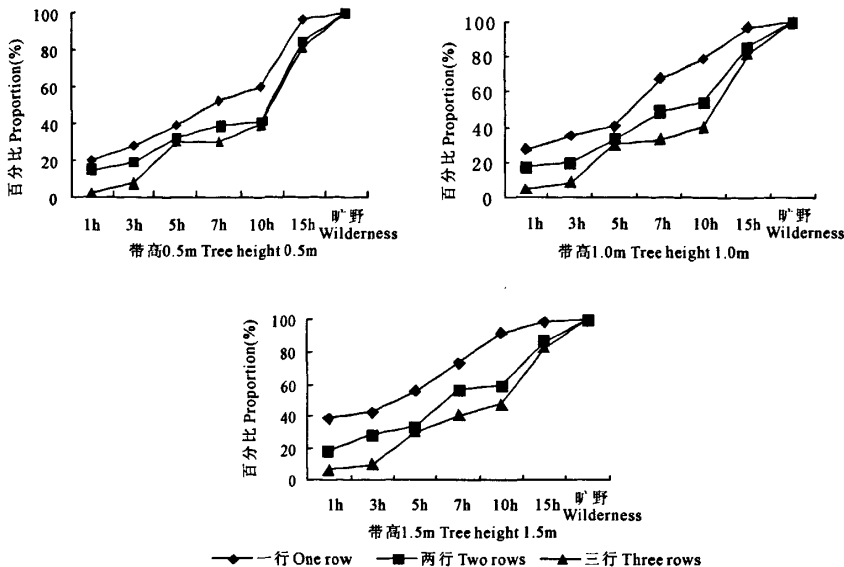
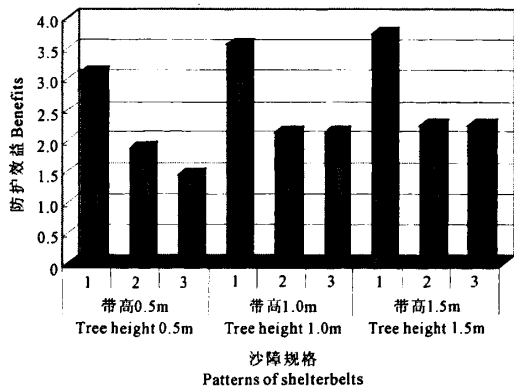


图 6 不同规格沙柳后不同位置处输沙率与旷野输沙率之比

Fig.6 Ratio of sand transport rate in various distance behind *Salix* and wild sand transport rate



注:1.一行;2.两行;3.三行。Note:1. One row;2. Two rows;3. Three rows.

图 7 不同规格沙柳防护林的成本效益

Fig.7 Cost-benefit of different spatial arrangements of shelterbelts

由图 7 可以看出,不同规格沙柳防护林的成本效益从大到小依次为:一行一带,带高 1.5 m > 一行一带,带高 1.0 m > 一行一带,带高 0.5 m > 两行一带,带高 1.5 m = 三行一带,带高 1.5 m > 两行一带,带高 1.0 m = 三行一带,带高 1.0 m > 两行一带,带高 0.5 m > 三行一带,带高 0.5 m。

随着林带高度的增加,其防护的效益也在增大。在三种高度的林带中,一行一带的配置格局防护效

果较理想,并且随着带高的增加防护效益增大。两行一带,行距 1.5 m 与三行一带,行距 1.5 m 的沙柳林在平均带高为 1.0 m 时其防护效益相等,说明当带高达到一定高度,防护效益并不随着行数的增加而减少,而是由林带内的各种配置参数综合决定的。

4 结论与讨论

低覆盖度时,植物的水平分布格局对固定流沙和阻止风沙流的作用差异很大。本实验观测结果表明,三种水平配置结构在同一高度处的平均风速行带式配置最小,均匀式配置居中,随机分布的最高。另一方面,行带式配置的廓线斜率最大,即风速变化最剧烈,而随机式配置的廓线斜率最小;说明行带式林带内风速降低最大,随机式风速降低最小,均匀式林带居中,即行带式林带具有显著地防止土壤风蚀的作用。

防护林的配置规格直接影响防护林的成本效益。防护林带越高,行数越多,防护效果越明显,但成本花费也高。本文通过实测计算,认为最能发挥效益的防护林配置格局为行带式配置中的一行一带配置模式;成本效益最低的配置为三行一带,带高 0.5 m,行距 0.5 m,带距 2.5 m 配置规格。带高 0.5 m 的防护林无论何种配置模式其防护效益均不及其

他两种带高的防护林的防护成本效益大。

本研究中成本效益的计算并未考虑沙柳林的复壮更新所需要的成本,如何在保证沙柳林的防风固沙效益前提下尽量减少其复壮更新的成本,是需要进一步研究的问题。

参考文献:

- [1] McTainsh G H, Lynch A W, Tews E K. Climate controls upon dust storm occurrence in eastern Australia[J]. *Journal of Arid Environments*, 1998, 39:457—466.
- [2] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 293—300.
- [3] 董治宝. 风沙起动的随机性及其判别[J]. *干旱气象*, 2006, 24(3): 1—4.
- [4] 周铁军, 赵庭宁, 孙保平, 等. 宁夏盐池县土地利用与景观格局变化研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 135.
- [5] 贺大良. 输沙量与风速关系的几个问题[J]. *中国沙漠*, 1993, 13(2): 14—18.
- [6] 杨文斌, 赵爱国, 王晶莹. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 108—111.
- [7] 凌裕泉, 屈建军, 金 炯. 稀疏天然植被对输沙量的影响[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 12—16.
- [8] 高 永, 邱国玉, 丁国栋, 等. 沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 365—367.
- [9] 贺学林, 史海莉, 白泽斌, 等. 毛乌素沙地使用植物资源开发利用研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4): 248—259.
- [10] 杨文斌, 丁国栋, 王晶莹, 等. 行带式柠条固沙林防风效果[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4106—4112.
- [11] 杨文斌, 卢 琦, 吴 波, 等. 低覆盖度不同配置灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 791—795.
- [12] 董治宝, 慕青松, 王洪涛. 风沙流中风速廓线的数值模拟与实验验证[J]. *气象学报*, 2008, 66(2): 159—163.
- [13] 于春堂, 杨晓辉, 尹伟伦, 等. 鄂尔多斯高原北缘唐古特白刺灌丛沙包的空间分布格局分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5): 39—44.
- [14] 黄富祥, 牛海山, 王明星, 等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J]. *地理学报*, 2001, 56(6): 700—709.
- [15] 赵国平, 胡春元, 张 勇, 等. 高立式沙柳防护林防风阻沙效益的研究[J]. *内蒙古农业大学学报*, 2006, 27(1): 59—63.
- [16] 王翔宇, 丁国栋, 高 函, 等. 带状沙柳防护林的防风固沙效益研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(2): 42—45.

Analysis of spatial patterns and benefit/cost of shelterbelts in arid areas

FENG Ze-shen, GAO Jia-rong, ZHAO Zhe-guang, HE Kang-ning, LI Bai

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Wind velocity profile gradients of three spatial arrangement patterns of *Salix psammophila* were measured. The results show that belt shrub community has the best windbreak effect, while the random has the poorest one. Near ground sand transporting rate and roughness of ground surface of shelterbelts were observed and benefit/cost for windbreak with different rows of *salix psammophila* belts were calculated. It is found out that spatial pattern of one-row belts, 1.5 m in height, 7.5 m in belt distance and 0.5 m in depth have the highest defending benefits. When with the same rows, the higher the plants are, the better are their defending benefits.

Keywords: shelterbelt; spatial pattern; wind velocity profile; benefit/cost