

利用 PIV 系统对防护林不同配置模式防护效益的研究

冯 瑞, 吴发启, 雷金银

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 农田土壤风蚀沙化是北方农牧交错区农业生产发展的主要限制因子, 为了研究防护林带防沙机理和防护效益, 利用 PIV (particle image velocimetry) 系统, 在风洞中对陕北靖边县 3 种不同的防护林模式进行了模拟实验研究。试验结果表明, 从起动风速、风蚀强度和流场特征三方面来看, 两行乔木中间夹两带灌木的防护林模式能达到最佳的防护效益, 是 3 种防护林模式中最佳的。乔灌结合的防护林模式防沙效果较好的原因是能显著降低近地表层风速。

关键词: PIV 系统; 风洞实验; 起动风速; 防护林; 防护效益

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)02-0005-05

中图分类号: S272.2, P425.6

Protection Benefits in Different Types of Shelter Belts Studied by Using PIV System

FENG Rui, WU Fa-qi, LEI Jin-yin

(College of Resources and Environmental Science, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Wind erosion is a significant factor limiting agricultural development in the north ecotone between agriculture and pasture. In order to study the mechanisms of windbreak, sand-fixation and protection benefits in shelter belts, wind erosion under three types of protective forest model was simulated in a wind tunnel experiment using the PIV system. Threshold shear velocity and wind erosion rate were measured, and velocity characteristics were obtained by using InsightNT software. Results show that the combination between arbor and shrub is a best protective forest structure model. The reason is that the structure model can significantly reduce wind velocity on soil surface.

Keywords: PIV system; wind tunnel experiment; threshold shear velocity; shelter belt; protection benefit

风洞是研究流体力学的重要手段, 得到了很多国家的关注, 随着技术的发展, 风洞的测量方法也一直在不断的完善之中。

目前, 粒子图像处理技术——PIV (Particle image velocimetry) 作为最新的风洞测量方法已经得到国际的普遍认可, 相应的研究也越来越多^[1]。

风洞技术为土壤风蚀和荒漠化防治研究提供了新的方法与手段。本文利用 PIV 系统在风洞对防护林的 3 种配置模式的防护效益进行了实验测量, 从而找到最佳的农田防护林配置模式, 使农田沙害降到最低程度, 为当地农田防沙提供科学的依据。

1 实验设备

1.1 风洞

实验是在西安交通大学生态环境与现代农业工程中心的直流吸气式阵风环境风洞中完成的, 该风洞为吸气式风洞, 入口部分设置了阻尼网和蜂窝器, 以此

保证洞中气流的均匀性, 尾部安装有一台变频风机, 风洞处于负压吸气状态^[2]。

吸气式风洞在很多方面都优于压入式风洞, 因为进来的风不受旋转的风扇所扰动, 还有一个突出的优点——风洞中的负压使所有的门和盖都紧贴着风洞的壁, 可以防止接触处漏气。风洞的结构见图 1。

风洞各项尺寸数据如下:

入口段: 高 × 宽 = 130 cm × 130 cm; 整流段: 高 × 宽 = 100 cm × 100 cm; 实验段: 高 × 宽 = 50 cm × 60 cm; 动力段: 半径 $r = 30$ cm。

1.2 PIV 系统

本实验采用美国 TSI 公司 2 帧 PIV 测试系统。主要包括激光光源、激光传输、图像采集、同步控制和图像数据分析等部分。激光光源采用集成式 Nd Yag 双激光器, 可产生能量为 300 mJ/pulse, 持续时间为 10 ns, 波长为 532 nm 绿色脉冲光束, 其工作频率为 10 Hz, 两激光器脉冲间隔为 200 ns~ 0.1 s, 可以满足

从低速到高速流动的测量需要。激光靠光臂传输,光臂由若干反射镜、转向节和管路组成,臂长 1.8 m,激光头包含柱面镜和球面镜,将激光变为二维片光照亮测试区^[3]。

采用 630046 型 PIV CAM 10—30 摄像机采集图像,其分辨率为 1 018×1 008 像素,最大图像采集速率为 30 帧/s。为获取绕林流场瞬时信息,PIV 提供了“跨帧(framesraddling)”技术,使采集一对图像间的时间间隔在 1 μs 以内。

同步仪控制激光脉冲发射和图像采集顺序,以及其它外部装置的信号触发,保证系统各个组成部分按照一定的时间顺序运行。

在运用 PIV 系统进行流动测量时,示踪粒子的选择和施放是获得理想测量结果的关键因素。实验的示踪粒子采用 Rosco1600 烟雾发生器产生,在稳定的工作状态下它为球形液滴,粒径为 1~2 μm,分布集中,可以满足 PIV 系统对示踪粒子的要求。在实验中,为了保证示踪粒子在气流中充分扩散,分布均

匀,不干扰流动状态,将烟雾随气流经过滤网过滤以后一同进入风洞,在第一实验段充分混合均匀后再进入测试区。

2 研究内容与方法

2.1 研究区概况

榆林市靖边县风沙区位于毛乌素沙地南缘,属暖温带干旱半干旱大陆性季风气候。年降水量 316~450 mm,主要集中在 7—9 月份,约占全年降水量的 60%~70%,并且多阵雨和暴雨;年蒸发量为 1 127~1 546 mm;年均气温 7.8℃~9.1℃,≥10℃的积温 2 600℃~3 370℃,无霜期 134~172 d,年日照时数 2 700~3 100 h,每年 3—5 月西北风盛行,常达 6~8 级,大于 5 m/s 的起沙风平均每年出现 220 次以上。由东南向西北降雨量和气温都递减,植被从森林草原地带逐渐向典型干草原地带、荒漠草原地带过渡。土壤以风沙土为主,还有少量的盐碱土、草甸土、沼泽土、水稻土分布。地下水埋藏浅,水分条件较好。

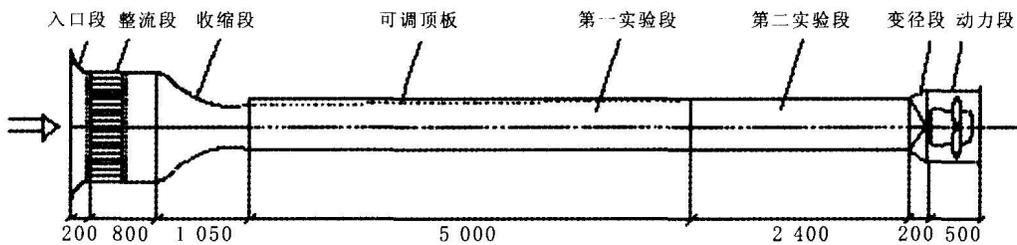


图 1 风洞结构示意图

陕西省榆林市靖边县风沙区的气候特点是春季干旱,日照充足;夏季高温,降水集中;秋季阴雨,降温迅速;冬季严寒,风沙强大。沙区地表土层疏松,由浮沙覆盖,植被稀少,干旱和风沙是该研究区两大严重的自然灾害。

2.2 实验方法

2.2.1 田间取样 风洞实验样品均采集陕北靖边县表层 15 cm 以上的农田土壤,在相对开阔平坦的部位选取采样点。取样时尽量不破坏试验段土样的自然状态,保持与原状土一致。

2.2.2 布置实验 结合当地调查结果,共设计了 3 种防护林模式(表 1)。把已采好的实验土样和不同防护林配置模式(防护林 A, B, C)的模型置于实验槽内,使土槽内的土壤表面与风洞底板齐平,农田地表构成了风洞实验段的底面,对 3 种防护林模式分别进行 9, 12, 14, 16 m/s 共 4 个不同级别的净风吹蚀,风速用 PIV 系统测定。在实验槽后面的中央轴线放置阶梯式集沙仪收集土壤风蚀物^[4]。

表 1 3 种防护林配置模式的设置方法

配置模式	设置方法
防护林 A	两行乔木,株行距: 6 cm×2 cm
防护林 B	两行乔木中间夹两带灌木,乔木株行距: 6 cm×8 cm,灌木株行距: 2 cm×3 cm
防护林 C	两行乔木中间夹三带灌木,乔木株行距: 6 cm×8 cm,灌木株行距: 4 cm×2 cm

2.2.3 实验数据的处理 PIV 系统的控制和数据分析软件为 InsightNT,工作平台为 WindowsNT4.0。该软件具备连续捕获 1 000 帧的 1 k×1 k 的高分辨率图像,并且具有批处理能力,可以快捷地得到流动瞬态的速度矢量场,并且配合使用 Tecplot 软件,可以对数据做进一步的处理,同时得到涡量场及剪切应变率的分布。

2.2.4 起动风速的测定 对每一供试土样首先进行起动风速的测定,用双面胶带放在实验土壤槽下风向边缘处捕获运动沙粒,通过肉眼观察,胶带上沙粒时,视为沙粒运动,此时的风速即为起动风速^[5]。

2.2.5 土壤风蚀强度的测定 单位时间(2 min)内以 10, 12, 14 和 16 m/s 共 4 组风速进行吹蚀, 测定不同风速下的土壤风蚀量, 土壤风蚀物用精度为 1/1000 的电子天平称重。各种土样在不同风速下的土壤风蚀量用土壤风蚀强度表示, 即单位时间内单位面积的风蚀量 $[\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{hm}^2)]^{[6]}$ 。

2.2.6 流场的测量 利用 PIV 系统测量 9, 12, 14, 16 m/s 下 3 种防护林模式的流场特征, 同时为了保证 PIV 的测量分辨率, 每次拍摄的流场范围只有 150 mm × 150 mm 左右, 然而测量模型周围希望观测的流场区域却比较大。实验风洞的测量区域达 1.6 m × 0.4 m, 为了充分利用实验条件, 获得更多的流场信息, 将一种测量模型的观测视场分割为 2 块, 最后将两块观测视场拼接为一幅整图。

3 实验结果与分析

在风洞中利用 PIV 技术, 不仅能观测起沙风速、风蚀量、风蚀强度等基础数据, 而且可以获得模拟风沙流通过防护林带时风速及流场变化的情况, 为研究防护林的防沙作用提供了准确的数据。

3.1 起动风速和土壤风蚀强度

这 3 种防护林模式的起动风速详见表 2。防护林 B 和防护林 C 的起动风速较防护林 A 提高了 15.3% 和 8.2%。

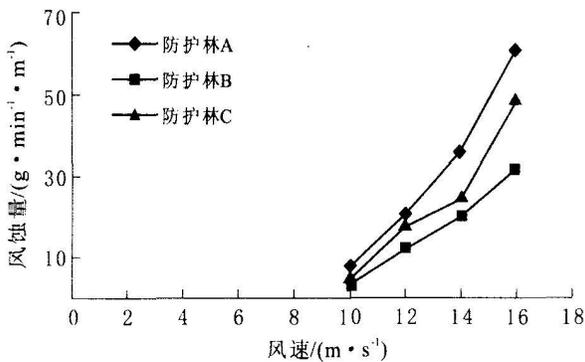


图 2 风蚀量随风速的变化

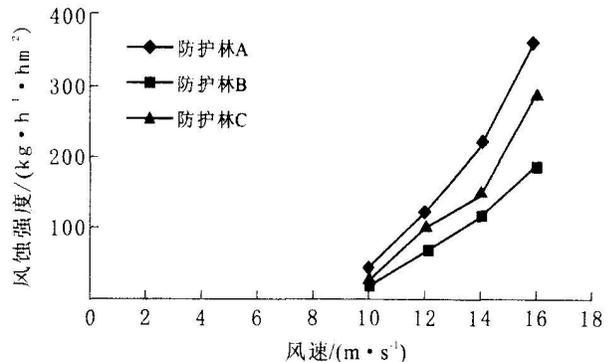


图 3 风蚀强度随风速的变化

表 3 不同风速下 3 种防护林模式风蚀量和风蚀强度

风速/ (m·s ⁻¹)	防护林 A		防护林 B		防护林 C	
	Q/ (g·s ⁻¹)	E/ (kg·h ⁻¹ ·hm ⁻²)	Q/ (g·s ⁻¹)	E/ (kg·h ⁻¹ ·hm ⁻²)	Q/ (g·s ⁻¹)	E/ (kg·h ⁻¹ ·hm ⁻²)
10	7.55	45.27	2.86	17.19	4.39	26.34
12	20.53	123.18	11.49	68.91	17.11	102.63
14	36.01	216.06	19.74	118.41	24.28	145.67
16	60.91	365.46	31.81	190.86	48.04	288.24

由此可见乔灌结合的防护林, 较纯乔木林更能提高起动风速, 这主要是由于灌木近地表层枝叶较多, 对空气流动的阻力较大。

表 2 3 种防护林模式的起动风速

配置模式	防护林 A	防护林 B	防护林 C
起动风速/(m·s ⁻¹)	8.5	9.8	9.2
相对增幅/%	—	15.3	8.2

将集沙量除以时间和集沙仪的进口宽度即得风蚀量 Q , 根据风蚀量 Q 得出风蚀强度 E (表 3)。

根据图 2 和图 3 可以看到: 防护林 B 在不同风速下的 Q 和 E 均为最小, 防护林 B 在 4 种风速下的 Q 和 E 较防护林 A 分别降低了 62.2%, 44.1%, 45.2% 和 47.8%。防护林 C 在不同风速下的 Q 和 E 居中, 防护林 C 在 4 种风速下的 Q 和 E 较防护林 A 分别降低了 41.9%, 16.7%, 32.6% 和 21.2%。防护林 A 的 Q 和 E 在 3 种防护林模式中最大, 所以其防护效益最差。这也说明乔灌结合的防护林防护模式防沙效果要优于纯乔木的防护林模式, 防护林 B 防护效益好于防护林 C。

3.2 流场特征

利用 Tecplot 绘制了 3 种防护林模式在风速为 9, 12, 14 和 16 m/s 时的整体流场, 并用周围数据的均值来修正流场速度图及涡量图的边界点值。

3.2.1 流场的变化 流场反映风速在空间的分布情况,可直观反映风速随不同高度和宽度变化情况,附图 1 为 3 种防护林模式在 9 m/s 的流场变化图。

从图 4 可以看出,这 3 种防护林模式具有共同的特点——当气流流向防护林时,气流受到防护林冠层的影响而抬升,使得在冠层顶部形成一个风速的加速区,在冠层后部是风速的减弱区,但随着距林带距离的增加风速有逐渐恢复的趋势^[7]。由于防护林 A 为纯乔木防护林,乔木之间行距较小,由于林带冠层的阻挡,冠层后部的风速较低,同一高度冠层后部的风速较冠层前减弱了 58%,而在近地表风速受到树干的影响在林带树干后形成了一个加速区,风速较林带前同一高度提高了 30%,更加有利于风蚀的发生。防护林 B 和防护林 C 是乔灌结合,由于近地表风速受到灌木的影响,林带后近地表风速较林带前同一高度的风速分别减弱了 18% 和 21%;防护林 C 是乔木之间夹 3 带灌木,两行乔木的行距比较大,所以使得在林带冠层后部的风速恢复的趋势比较慢;而防护林 B 乔木之间夹 2 带灌木行距比较近,风速恢复的趋势相对较快。然而风蚀主要发生在地表,防护林 A 没有降低近地表的风速反而增加了近地表的风速,增进了风蚀的程度,防护林 B 和防护林 C 有效地抑制了近地表的风速,减弱了风蚀的程度。

3.2.2 流线的变化 流线即为气流流动的趋势线,附图 2 为 3 种防护林模式在 12 m/s 的风速下流线变化图。如附图 2 所示:防护林 A 的林带前流线比较均匀流畅,由于冠层的阻挡,流线向上抬升,流线密度增大;然而在冠层后部的流线密度又急速的下降,同时在林带后近地表流线密度又迅速增大,这样在林带冠层后部生成一个向下旋转的涡旋,形成一个湍流区^[8],流线杂乱无章,极不稳定,易发生风蚀。防护林 B 和防护林 C 林带前的流线均匀平坦,非常稳定。由于它们是乔灌结合,乔木之间的距离比较大,流线被冠层抬升,且流线密度增大的趋势也比较缓慢,所以在林带上方和冠层后部均形成一个平稳区,流线较为平坦;在近地表由于灌木的阻挡作用,流线有略向上抬高的趋势,但流线比较流场平坦,流线密度变化也不大,也形成一个平稳区。

3.2.3 速度等势线的变化 速度等势线是同一风速点的连线,反映了风速的空间分布情况,附图 3 为 3 种防护林模式在 14 m/s 的速度等势线图,图中的数值为该等势线的速度值。

从附图 3 可以看出防护林的冠层通过阻力的形式从气流中吸取能量,使得气流的势能降低,因此较大的阻力在大气边界层中引起较大的风速亏损。防

护林 A 在林带冠层后形成一个新的较低的速度等势线,这个速度等势线的风速衰减比较快且远远小于林带前速度等势线的风速,风速回落比较慢,恢复区域也比较大,然而在近地表林带后形成新的速度等势线的风速则是远大于林带前的风速,也就是说防护林 A 是增大了近地表风速,增加了发生风蚀的可能性。从防护林 B 和防护林 C 来看,它们林带冠层前后的速度等势线比较平稳,较林带前的速度等势线的风速变化不大,风速恢复的较快,然而防护林 B 和防护林 C 在林带后近地的速度等势线的风速下降的非常快,恢复的却很慢,非常有效地减弱了近地表风速。防护林的最好效果并不意味着将风速减为零,其目的是在近地表的薄边界层内,作物需要保护的地方减小到低于危险风速^[9],防护林 B 和防护林 C 降低了发生风蚀的可能性。

3.2.4 能量的变化 运动气流具有的能量是风力侵蚀发生的根本动力,而气流的能量由风速决定,风速大气流的能量也就大,气流携沙的能力也就大。防护林冠层通过减小风速能够降低气流的能量,附图 4 为 3 种防护林模式在 16 m/s 能量变化图,图中的数值为该点的风速值。

从附图 4 我们能够看出,3 种防护林林带的顶部均为一个加速区,正是由于林带冠层的阻挡,气流被抬升,在林带顶部形成高能区,气流的能量远远大于林带前的气流,林带顶部气流的风速较林带前气流的风速提高了 33%。防护林 A 是纯乔木林带,两行乔木间距离又比较接近,在林带后部能量迅速衰减,形成一个低能区,风速较林带前降低了 58%,能量和风速直到林带 3 倍树高后才缓慢的恢复,然而底部受树干的作用,在近地表形成第 2 个高能区,这样就使得在整个冠层背后的能量极不稳定,形成一个湍流区,分布着大小不一的旋涡,这样使得近地表气流的能量增大,风速也变大,使得近地表的土壤处于一个极不稳定的状态,加快了风蚀的发生。由于冠层的抬升作用防护林 B 和防护林 C 只有在林带顶部形成一个高能区,但这并不影响近地表风速,防护林 B 和防护林 C 是乔灌结合,乔木之间的行距较大,林带后气流的能量慢慢恢复,使得能量也比较稳定,近地表气流的能量由于受到灌木的阻挡被迫抬升,这样在林带后近地表形成一个低能区,近地表风速也得到有效控制,从而降低风蚀了发生的可能性^[10]。

综上对 3 种防护林模式流场的变化、流线的变化、速度等势线的变化以及能量的变化分析得出:防护林 B 和防护林 C 由于采用了乔灌结合的模式,灌木层显著增加了近地表层空气运动的阻力,因此不仅

降低林带冠层后的风速,更显著地是降低了近地表的风速,平均较林带前降低了 38% 和 32%,分别低于其起动风速 9.8m/s 和 9.2m/s;而防护林 A 林带后的近地表风速较林带前平均提高了 17%,反而大于其起动风速,这就是防护林 A 风蚀较防护林 B 和防护林 C 剧烈的原因。因此乔灌结合的防护林模式的防护效益确好于纯乔木的防护林,其中防护林 B 的防护效益要好于防护林 C。

3 结论

(1) 在风洞中采用 PIV 技术,不仅能观测起沙风速、风蚀量、风蚀强度等基础数据,而且可以清晰地模拟风沙流通过防护林带时风速变化的情况,有助于进一步研究防护林防沙的作用机理。风洞技术为土壤风蚀和荒漠化防治提供了新的科研途径。

(2) 陕北靖边县不同防护林配置模式的防护效益是明显的,可有效地减弱风蚀量,增大了起动风速,同时使穿过林带气流的能量大大降低,减轻了当地农田沙害。

(3) 通过实验资料分析,乔灌结合的防护林模式防沙效果较好的主要原因是灌木层可以有效地降低近地表面的风速。

(4) 从起动风速、风蚀强度和流场三方面来看,防护林 A、防护林 B 和防护林 C 这 3 种模式的防护效

益 A 最最差,B 和 C 明显要好于 A,但是 B 的防护效益是 3 种防护模式中最好的,即在 3 种防护林模式中防护林 B 是最合理和最佳的防护林配置模式。

[参 考 文 献]

- [1] 刘宝杰,王光华,等. PIV 在低速风洞中的应用[J]. 流体力学实验与测量, 1998, 6(2): 55—62.
- [2] 王元,吴廷奎,张希明,等. 塔南绿洲优化防护模式风洞实验研究初探[J]. 干旱区研究, 1995, 4(12): 76—80.
- [3] 姚仁太,张茂栓. 环境风洞流动的 PIV 测量[J]. 流体力学实验与测量, 1999, 13(3): 91—96.
- [4] 王忠林,高国雄,李会科,等. 毛乌素沙地农田防护林结构配置研究[J]. 水土保持研究, 1995, 2(2): 99—109.
- [5] 刘小平,董治宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 2—4.
- [6] 容姣凤,张海涛,毛宁. 土壤风蚀量随风速的变化规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 149—153.
- [7] Lyles L, Krauses R K. Threshold velocities and initial particle motion as influenced by air turbulence[J]. Trans of the ASAE, 1971, 14(3): 563—566.
- [8] 王浩, Takle Eugene S. 防护林: 湍流的数学模型与计算机模拟[J]. 力学进展, 2003, 33(1): 119—135.
- [9] 董治宝,高尚玉. 直立植物—砾石覆盖组合措施的防风蚀作用[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 8—11.
- [10] 金文,王元,张玮. 疏透型防护林绕林流场的 PIV 实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(4): 56—61.

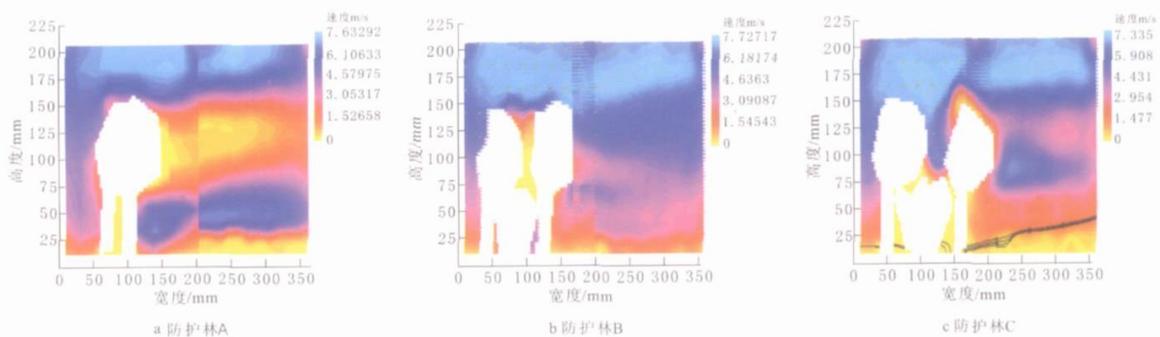
(上接第4页)

(4) 雨强及坡度对道路侵蚀的影响均可用幂函数相关方程描述。其中,降雨强度小于 2 mm/min 条件下,侵蚀模数随雨强增大而增加的趋势比较缓和,降雨强度大于 2 mm/min 后,侵蚀模数增幅很大。侵蚀模数随坡度的变化,在试验坡度范围内,以基本相同的幅度较缓地增加。

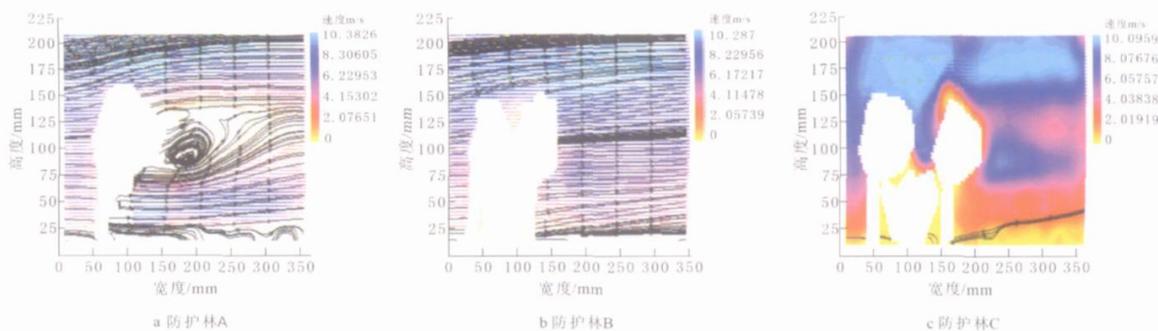
(5) 雨强及坡度对道路侵蚀模数的综合作用可用二元线性相关方程描述。

[参 考 文 献]

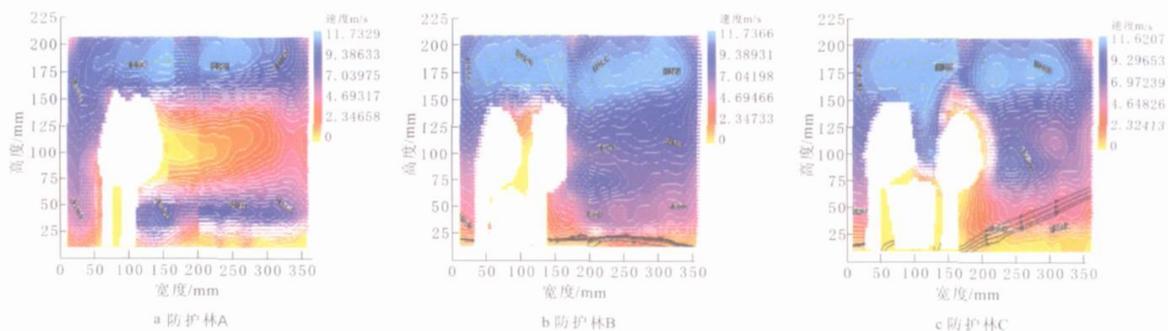
- [1] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业[M]. 北京: 农业出版社, 1989. 96—121.
- [2] 孙建轩. 山区道路的水土流失及防治[J]. 水土保持通报, 1981, 1(4): 45—47.
- [3] 邱荣祖,方金武. 山地林道土壤侵蚀及其防蚀措施的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 50—54, 87.
- [4] 邱荣祖,王玉明,康文和. 山地林道路面土壤侵蚀的研究[J]. 森林工程, 1997, 13(4): 44—46.
- [5] 邱荣祖,韩忠有,许敏锋. 山地林道边坡土壤侵蚀及其防蚀措施的研究[J]. 森林工程, 1999, 15(2): 38—40.
- [6] 郑世清,周保林,赵克信. 长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防蚀措施[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 29—35.
- [7] 郑世清. 沟坡道路侵蚀与防蚀技术体系[M]. 长武农业生态系统结构、功能及调控原理与技术. 北京: 气象出版社, 1998. 163—171.
- [8] 郑世清,周保林. 黄土高原沟壑区防蚀道路设计[M]. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 163—171.
- [9] 王玉宽,王占礼. 黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 25—31.
- [10] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(3): 78—83.
- [11] 刘小勇,吴普特. 硬地面侵蚀产沙模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 33—37.
- [12] 郑世清,周佩华. 土壤容重和降雨强度与土壤侵蚀和人参关系的定量分析[J]. 西北水土保持研究所集刊, 1988(7): 53—56.
- [13] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991(4): 39—46.



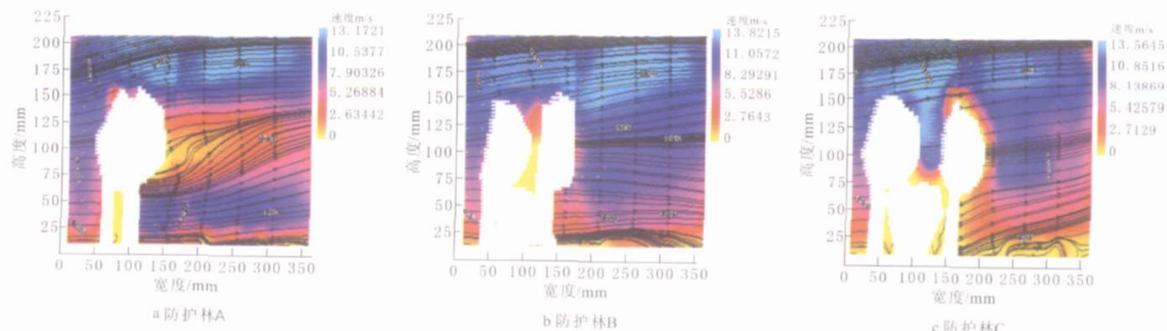
附图1 3种防护林模式在9m/s风速下的流场变化



附图2 3种防护林模式在12m/s风速下流线的变化



附图3 3种防护林模式在14m/s风速下速度等势线的变化



附图4 3种防护林模式在16m/s风速下流场、流线及速度的变化