

干枯植被覆盖对公路沿线地表风沙流结构的影响

冬梅¹, 图雅², 李巨河¹

(1.内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.内蒙古农业大学 机电工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 以内蒙古 S105 草原公路沿线地表为研究对象, 探讨挟沙风作用下干枯植被覆盖度对风沙流结构的影响, 旨在为防治公路两侧土壤风蚀提供理论参考依据。[方法] 采用风洞模拟试验, 在 0%, 20%, 40% 和 50% 覆盖度水平下测定输沙率。[结果] 在挟沙风作用下, 输沙率随干枯植被覆盖度的增大而递减, 最大输沙率点的高度层不断上升。覆盖度为 0% 时, 输沙率随高度的增加呈指数函数规律降低; 覆盖度为 20%, 40% 和 50% 时, 输沙率随高度的增加呈递减→递增→递减→趋于平缓的变化规律; 在 85 mm 高度以下符合多项式函数关系, 85 mm 高度以上符合指数函数关系。随覆盖度的增大总输沙量递减, 最大抗风蚀效率达 65.73%。[结论] 干枯植被覆盖显著影响地表风沙流结构, 可削弱挟沙风侵蚀力, 是抑制公路沿线地表土壤风蚀沙化的有效措施。

关键词: 公路沿线环境; 土壤风蚀; 挟沙风; 干枯植被覆盖; 风沙流结构

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0017-07

中图分类号: S157

文献参数: 冬梅, 图雅, 李巨河. 干枯植被覆盖对公路沿线地表风沙流结构的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 17-23. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230508.001; Dong Mei, Tu Ya, Li Juhe. Effect of dry vegetation cover on surface sand-carrying wind structure along highways [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 17-23.

Effect of Dry Vegetation Cover on Surface Sand-carrying Wind Structure Along Highways

Dong Mei¹, Tu Ya², Li Juhe¹

(1. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The influence of dry vegetation cover on the structure of wind-blown sand flow under the action of sand-carrying wind of S105 in Inner Mongolia Autonomous Region was studied in order to provide a theoretical reference for the prevention of soil wind erosion on both sides of a grassland highway. [Methods] Sediment transport rates were measured at 0%, 20%, 40%, and 50% vegetation cover levels by wind-tunnel simulation tests. [Results] Under the action of sand-carrying wind, the sediment transport rate decreased as dry vegetation cover increased, and the height of the maximum sediment transport rate rose as cover increased. When vegetation cover was 0%, the sediment transport rate decreased exponentially as height increased. As vegetation cover increased to 20%, 40%, and 50%, the sediment transport rate decreased, then increased, then decreased, and then tended to be flat as height concurrently increased. These results can be described by a polynomial function below 85 mm height and by an exponential function above 85 mm height. Total sediment discharge decreased as vegetation coverage increased, and the maximum anti-wind erosion efficiency was 65.73%. [Conclusion] Dry vegetation cover significantly affected the structure of surface wind-blown sand flow, which can weaken the erosion force of sand-carrying wind. Dry vegetation

收稿日期: 2022-10-06

修回日期: 2022-12-05

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“半干旱地区草原公路沿线地表土壤风蚀研究”(2020MS03050); 内蒙古自治区科技重大专项专题项目(2020ZD0009-4); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0078)

第一作者: 冬梅(1979—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 硕士, 副教授, 主要从事农业机械化新技术研究和土壤风蚀测试与控制研究。Email: liangdongmei@imau.edu.cn.

通讯作者: 图雅(1978—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区通辽市人, 副教授, 硕士, 主要从事农业机械设计及制造和土壤风蚀测试与控制研究。Email: baotuya1004_2009@sohu.com.

cover is an effective means of inhibiting wind erosion and desertification of surface soil along highways.

Keywords: highway environment; soil wind erosion; sand-carrying wind; dry vegetation cover; structure of wind-blown sand flow

干旱半干旱地区地表较脆弱,在风的作用下极易被吹蚀、分离,使土壤风蚀成为该地区主要环境问题之一。由于气候干燥、风力强劲,风沙环境对公路及其沿线地表造成了严重的影响^[1-3]。在公路修建过程中,原始地表遭受破坏,植被覆盖度减少,使土壤裸露加速了风蚀^[4-7]。因此,减少风沙的危害,保护公路,抑制风蚀,势在必行^[8-10]。植被覆盖对土壤风蚀具有影响作用已被研究者们公认^[11-13]。董治宝^[11]、黄富祥等^[12]通过风洞试验研究了植被覆盖对土壤风蚀的影响。王强强等^[14]通过风洞模拟试验,分析比较了,在植被覆盖度均为 20% 的条件下,固沙林降低风速的效果。张奕等^[15]通过实地考察与风洞试验结合,研究了生长季灌木单株对周围风速流场、输沙率和地表蚀积特征的影响。徐沛东等^[16]对科尔沁区沙丘采用风洞原位测试发现,不同植被盖度下,输沙率与高度之间均服从指数函数关系。刘艳萍^[17]、邢恩德等^[18]对草原区不同植被盖度下的风沙流结构特征进行了研究。虽然植被覆盖与土壤风蚀关系研究很多,但在公路沿线地表植被覆盖及风沙流分布规律方面,以往的相关报道较少。因此,本研究采用风洞模拟试验,测定输沙率,以期阐明公路沿线植被覆盖度与风沙流结构之间的定量关系,研究结果可为掌握该研究区公路沿线地表风沙运动规律,制定风蚀防治对策,保证公路安全运营提供理论参考依据。

1 试验设计、材料与方法

1.1 试验区概况

研究区为内蒙古 S105 省际大通道锡林郭勒盟境内桑根达来路段。该区域属于温带大陆性气候,其主要气候特点是风大、干旱、寒冷。年平均气温为 3.4 °C,年降水量均值为 377.5 mm,全年大风季节集中在每年 3—5 月,大风日数 21 d,年平均风速为 3.26 m/s。全年主要风向为北风与西北风。土壤类型风沙土、栗钙土为主^[19],部分地区有棕钙土和草甸土等。

1.2 试验设计

试验于 2021 年春季在内蒙古农业大学风洞实验室内进行。试验风洞由风机段、风机整流段、扩散段、收缩段、试验段组成,全长为 11.8 m,其中试验段长度为 7.2 m,截面为 1.0 m×1.2 m,收缩比 1.7,试验段轴向静压梯度 ≤ 0.005 ,各截面不同高度上紊流度 $\epsilon \leq 1\%$ ^[20]。风机为轴流风机,出风口直径 1.4 m,所需功率 40 kW,风速 0~20 m/s 连续可调。经中国科学

院寒区旱区环境与工程研究所测定,该风洞主要指标符合低速风洞的设计要求。风洞加沙器由 Y90 S-6 型电动机为动力源,通过 ARISPEED616 PC5 变频器调节转速实现加沙量定量增减。集沙仪为 BL-DJSQ 方口多路阶梯式集沙仪。集沙口宽度 20 mm,高度 10 mm,安置在风洞轴线,距风洞出口 1 200 mm 处,可同时收集垂直方向 30 个点位的输沙量。

试验土样采自内蒙古 S105 省际大通道锡林郭勒盟境内桑根达来路段两侧,是春季地表 5 cm 深度范围内原位风沙土(土体结构已发生破坏),平均含水率 2.1%。采样环境温度 15 °C,大气平均压力 839 kPa。研究路段处于典型草原地带的沙地^[19-20],经调查公路两侧植被覆盖度 23%~55%,平均高度 100 mm,荒野旱地常见的植物虎尾草(*Chloris virgata*)与狗尾草(*Setaria viridis*)均有分布^[21]。基于此,在本次风洞模拟试验中选择了 0%,20%,40%和 50%共 4 个覆盖度水平,植被由狗尾草和虎尾草组成。为方便对照分析,将 0%水平确定为无任何覆盖物的裸露地表。布置植物覆盖地表时,首先在风洞试验段内将土样铺成 3 000 mm×1 000 mm×10 mm 试验床面,距集沙仪集沙口水平距离 200 mm,试验布置如图 1 所示。然后用热熔胶将干枯虎尾草、狗尾草随机固定在已铺好的试验床面上。植被覆盖度大小由各植物单体在地表的投影面积总和与所铺试验床面总面积之比来确定^[22],模拟地表如图 2 所示。试验风速为 9, 12 和 15 m/s 共 3 个挟沙风速。对模拟地表的吹蚀时间均为 10 min,时间一结束使用精度为 0.001 的电子天平称量集沙仪收集的风蚀物。

2 结果与分析

2.1 挟沙风对风沙流结构影响

长期以来,研究者们对沙漠戈壁^[12]、沙地^[16]、草地^[17-18]、农田地表^[23]的风沙流结构进行了深入研究。风沙流结构是气流搬运的沙子在搬运层内随着高度的分布情况^[24],其特征结构受到风力、地表状态等因素的影响,其中风力是主导因素。在本研究中,着重分析挟沙风作用下的公路沿线地表风沙流结构,以探讨干枯植被覆盖度对土壤风蚀的抑制作用。由图 3 可看出,在覆盖度 0%时,输沙率受风速影响较大,随风速增大而增大。输沙率随高度的增加呈骤减→递减,至 245 mm 后变化幅度很小,输沙率最大值在距地表最近位置。在覆盖度 20%、挟沙风速为 9 m/s

时, 输沙率随高度的增加锐减后又递增, 至 85 mm 时最大, 再递减后趋于变化平缓; 12 m/s 时, 随高度的增加递减, 至 45 mm 后又递增, 85 mm 时达最大值, 再递减至 245 mm 后趋于变化平缓; 15 m/s 时, 输沙率从 25 mm 处递增至 65 mm 时达最大值, 再递减至 225 mm 后趋于变化平缓。在干枯植被覆盖度 40%, 挟沙风速为 9 m/s 时, 输沙率随高度的增加先递减再递增, 至 125 mm 时达到最大值, 再递减后趋于变化平缓; 12 m/s 时, 随高度的增加锐减至 45 mm 处, 再

增加至 85 mm 时达最大值, 之后又锐减至 225 mm 处后趋于变化平缓。风速 15 m/s 时, 输沙率随高度的增加而骤减, 再增加至 105 mm 时达最大值, 再递减至 205 mm 后趋于平缓。在干枯植被覆盖度 50%, 挟沙风速为 9 和 12 m/s 时, 输沙率随高度的增加先递减再递增, 至 105 mm 时达最大值, 再递减至 245 mm 后趋于平缓。15 m/s 时, 输沙率随高度的变化趋势与 9 和 12 m/s 时类似, 达最大值点 85 mm 后又递减至 245 mm, 再趋于平缓。

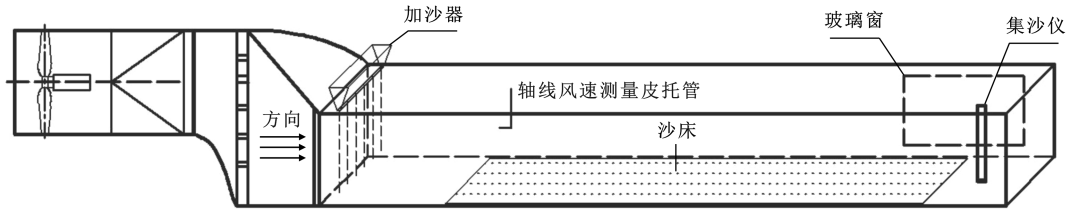


图 1 风洞模拟试验布置图

Fig.1 Layout diagram of wind tunnel simulation test

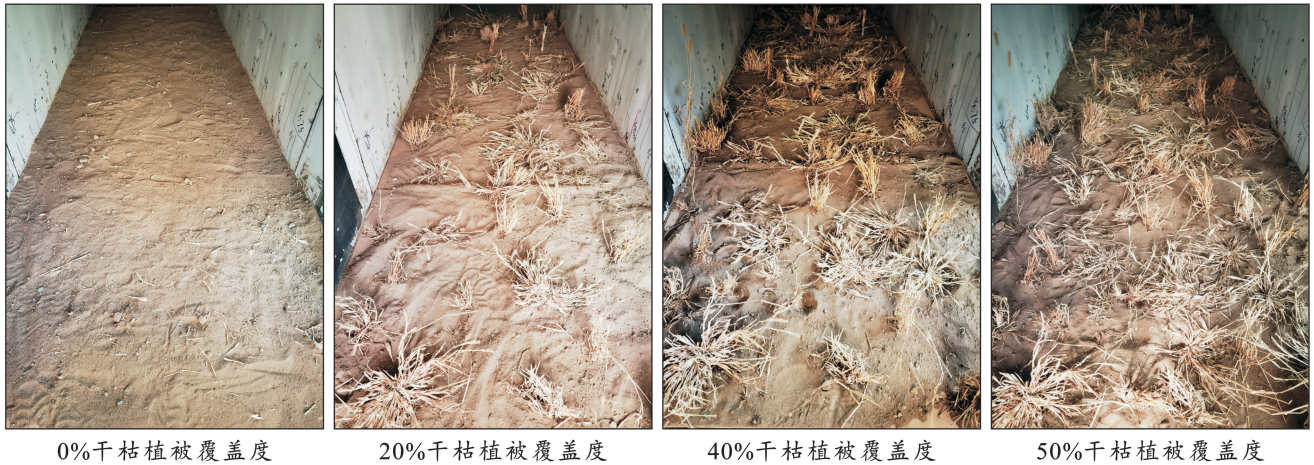


图 2 不同干枯植被覆盖度模拟地表情况

Fig.2 Simulated surface conditions with different dry vegetation coverage

植被覆盖度为 0% 时(地表无任何覆盖物), 输沙率随高度的增加而递减, 拟合为指数函数关系(图 4)。覆盖度增加至 20%, 40% 和 50% 时, 输沙率随高度的变化趋势出现变异, 即风沙流结构中最大输沙

率点并未出现在距地表最近的位置, 如图 4 所示。此时, 风沙流结构的分布可通过两个函数分段描述: 85 mm 以下, 输沙率与高度之间遵循多项式函数关系, 85 mm 以上遵循指数函数关系(表 1)。

表 1 不同干枯植被覆盖度下输沙率与高度的函数关系

Table 1 Functional relationship between sediment transport rate and height under different dry vegetation coverage

覆盖度/%	拟合函数 1			拟合函数 2		
	拟合公式	R^2	p	拟合公式	R^2	p
0	$y = 5.3607e^{-0.0182x}$	0.9874	<0.001	$y = 5.3607e^{-0.0182x}$	0.9874	<0.001
20	$y = 0.0002x^2 - 0.0101x + 0.8143$	0.7937	<0.001	$y = 1.7751e^{-0.007x}$	0.9501	<0.001
40	$y = 0.0001x^2 - 0.008x + 0.4997$	0.8511	<0.001	$y = 1.4101e^{-0.008x}$	0.9755	<0.001
50	$y = 6E-05x^2 - 0.0027x + 0.3339$	0.8209	<0.001	$y = 3.9313e^{-0.016x}$	0.9752	<0.001

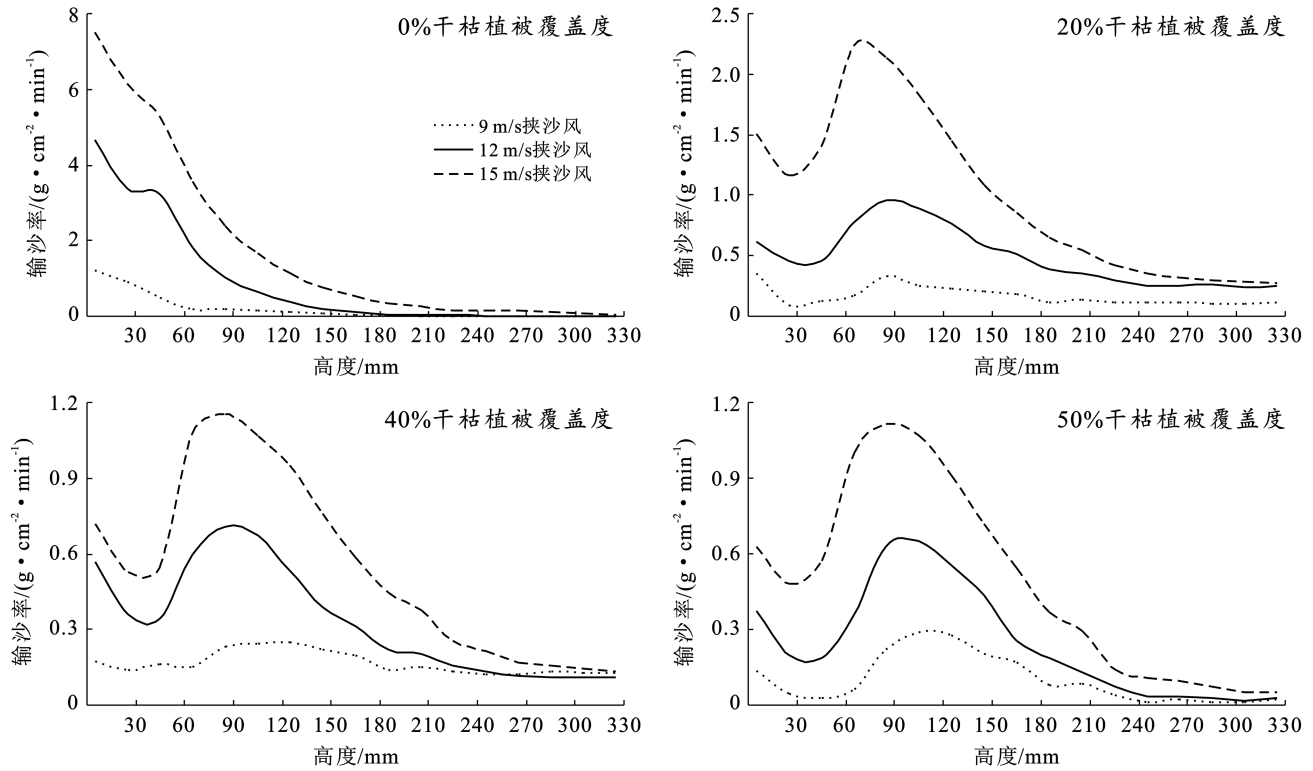


图 3 0%,20%,40%,50% 干枯植被覆盖度下风沙流结构

Fig.3 Wind-blown sand flow structure diagram under dry vegetation coverage of 0%, 20%, 40% and 50%

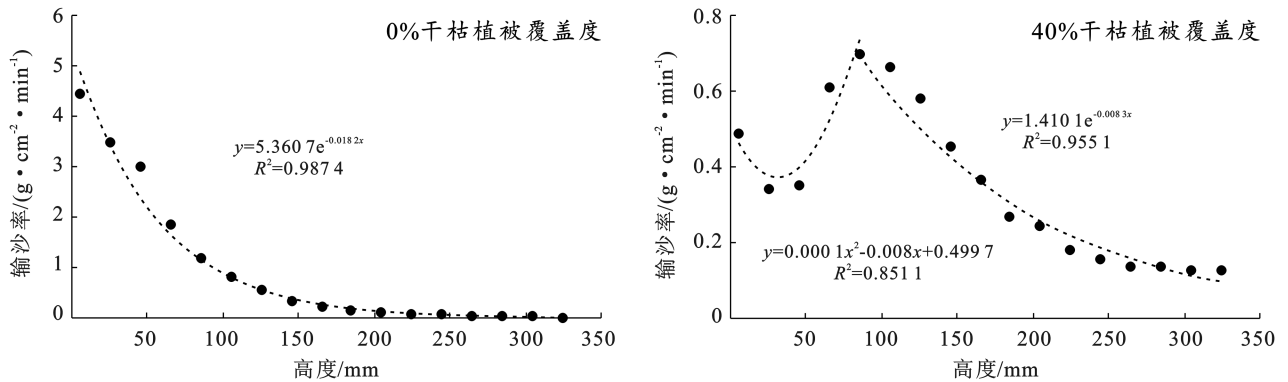


图 4 不同干枯植被覆盖度地表输沙率随高度的变化趋势

Fig.4 Variation trend of surface sediment transport rate with height under different dry vegetation coverage

2.2 干枯植被覆盖度对风沙流结构的影响

土壤风蚀实质上是风力对土壤表层的剪切破坏^[25],在此过程中植被是控制风蚀的主要因子之一。从图 5 可以看出,裸露地表最易被风蚀。当覆盖度为 0% 时,在 9,12 和 15 m/s 挟沙风下,5—145 mm 高度的输沙率为总输沙率的 96.3%,98.3% 和 93.9%,风沙流活动集中在 145 mm 以下,其各高度层收集土样百分比如表 2 所示。当覆盖度增大至 20%,40% 和 50% 时,输沙率随干枯植被覆盖度的增大而减少,随高度的增加呈现出递减→递增→递减→趋于稳定的变化规律。在 9,12 和 15 m/s 挟沙风速下,裸露地表的总输沙量最大,且在 5—165 mm 高度层内的输沙

量占总输沙量的 97.6%,97.7% 和 95.7%;覆盖度为 20% 时,占总输沙量的 71.4%,73.5%,81.3%;覆盖度为 40% 时,所占比例分别为 72.7%,79.4%,81.6%;覆盖度为 50% 时,占 83.1%,86.6%,87.4%。说明大部分输沙活动集中在 5—165 mm 高度内。由表 2 可看出,覆盖度由 20% 增大至 40% 时,5—45 mm 高度的土样百分含量减少了 10.1%,增大至 50% 时减少了 32.0%。覆盖度由 20% 增大至 40% 时,85—165 mm 高度的土样百分含量增加了 10.5%,提高至 50% 时增加了 45.7%。综上所述,干枯植被覆盖度的变化影响了风沙流结构,随覆盖度的增大近地表输沙率递减,而最大输沙率点不断上升。

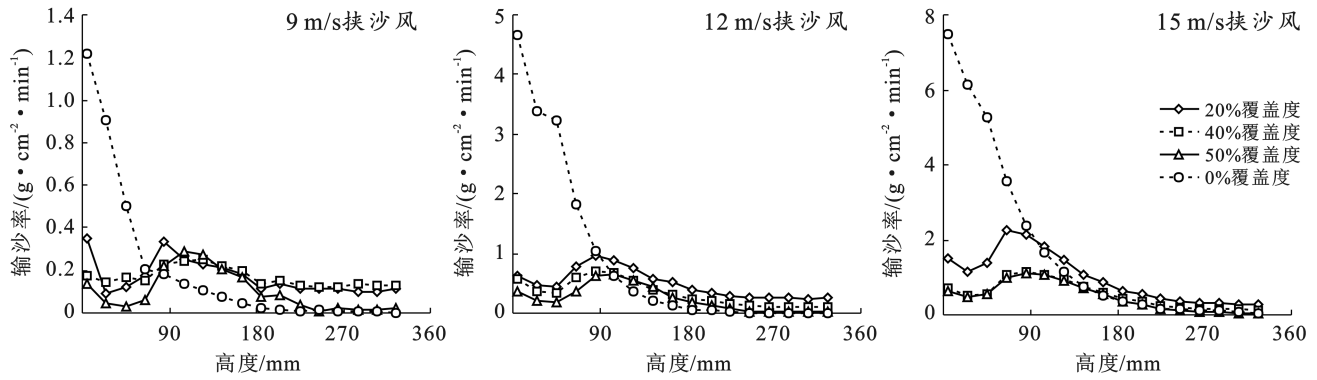


图 5 9, 12, 15 m/s 挟沙风作用下风沙流结构

Fig.5 Wind-blown sand flow structure under action of sand-laden wind at 9, 12 and 15 m/s

表 2 不同干枯植被覆盖度下各高度层收集土样比例

Table 2 Proportion of soil samples collected at different heights under different dry vegetation coverage %

高度/ mm	9 m/s 挟沙风				12 m/s 挟沙风				15 m/s 挟沙风			
	0%	20%	40%	50%	0%	20%	40%	50%	0%	20%	40%	50%
5	35.23	12.39	9.11	7.84	29.96	8.46	10.10	8.24	24.78	8.96	6.99	6.16
25	25.13	5.26	5.01	2.69	21.26	5.49	6.35	4.70	20.28	6.93	5.15	4.69
45	14.54	5.39	5.79	1.58	18.64	5.44	6.07	4.43	17.40	8.34	5.30	5.68
65	6.94	7.04	8.40	3.68	11.61	9.40	10.58	8.72	11.81	13.32	11.51	9.78
85	5.19	11.15	11.12	12.81	6.61	11.54	12.49	15.09	7.89	12.68	13.22	15.47
105	4.06	8.34	9.58	16.73	4.07	10.78	11.94	15.57	5.46	10.85	15.37	15.44
125	3.04	7.90	8.79	16.08	3.41	9.16	9.48	13.30	3.76	8.64	10.26	14.91
145	2.14	7.37	7.80	12.05	1.32	7.05	6.83	10.40	2.51	6.47	8.12	9.05
165	1.30	6.53	7.06	9.68	0.85	6.16	5.54	6.11	1.76	5.12	5.68	6.20
185	0.75	4.11	4.87	4.50	0.80	4.61	3.95	4.48	1.16	3.87	4.33	3.61
205	0.49	4.77	5.29	4.97	0.76	4.22	3.56	3.19	0.94	3.25	3.66	2.86
225	0.23	4.06	4.62	2.34	0.52	3.56	2.76	1.80	0.54	2.49	2.47	2.10
245	0.38	3.93	2.31	0.64	0.05	3.03	2.37	1.21	0.53	2.10	2.06	1.07
265	0.23	3.90	2.34	1.23	0.03	3.06	2.07	1.01	0.45	1.88	1.66	0.93
285	0.12	3.51	2.77	0.90	0.02	3.11	1.96	0.62	0.39	1.79	1.53	0.75
305	0.14	2.01	2.55	0.82	0.06	2.92	1.95	0.46	0.26	1.71	1.40	0.61
325	0.09	2.34	2.59	1.46	0.03	2.01	2.00	0.67	0.08	1.60	1.29	0.69
合计	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

2.3 干枯植被覆盖度对土壤风蚀的削弱影响

为分析干枯植被覆盖度与土壤风蚀之间的关系, 将各高度层输沙量累加后, 讨论覆盖度与总输沙量之间的关系。

由图 6 可看出, 在 15 m/s 挟沙风时, 总输沙量随覆盖度的增大急剧降低; 12 m/s 时, 0%~20% 覆盖度下有较明显的下降趋势, 大于 20% 降低速率减缓; 9 m/s 时, 在各覆盖度下缓慢减少。分析植被覆盖度对土壤风蚀的削弱作用时, 以 0% 覆盖度水平下的输沙量为基准, 计算其他覆盖度下输沙量变化值占参考输沙量的百分比称作为抗风蚀效率^[26]。计算结果表

明, 随植被覆盖度的增加, 抗风蚀效率明显提升, 覆盖度由 20% 变化至 40% 时, 抗风蚀效率平均值由 36.21% 提高至 49.23%, 增加了 13.02%。覆盖度由 40% 变化至 50% 时, 抗风蚀效率平均值由 49.23% 提高至 65.73%, 增加了 16.5%。综上所述, 总输沙量随挟沙风速的增大而增加。当风速为一定时, 总输沙量随干枯植被覆盖度的增大而减少, 其表现为: 0% > 20% > 40% > 50%, 即随覆盖度的增加, 抗风蚀效率明显提升。所以, 在北方半干旱地区的大风时节, 干枯植被覆盖能削弱挟沙风的侵蚀力, 有效抑制土壤风蚀, 保护公路及其沿线地表。

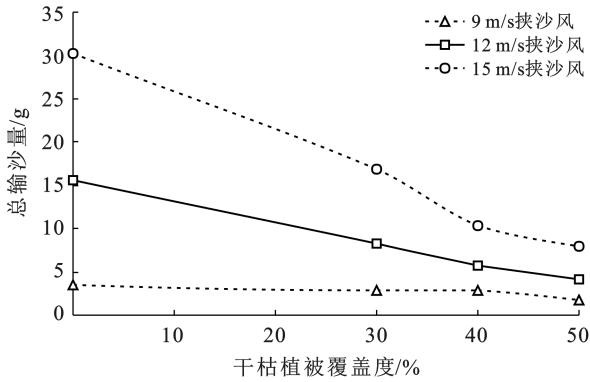


图 6 不同风速下的总输沙量变化趋势

Fig.6 Variation trend of total sediment discharge under different wind speeds

3 讨论与结论

3.1 讨论

风沙流结构是指风沙流中搬运的沙粒在搬运层内随垂直高度分布特征及变化规律^[22],其结构特征受下垫面性质、风速、植被盖度等的强烈影响。植被是介于气流与地表之间对风力侵蚀力造成干扰的粗糙元^[25],不同特征的植被对风蚀的影响差异很大^[22]。在本研究中,裸露地表的输沙率随高度的增加而递减,风沙流结构呈现出指数分布规律,该结果与余沛东^[16]、邢恩德等^[18]的研究结论一致。

在 20%,40%,50%覆盖度下,5—45 mm 高度层的平均土样百分含量为 22.2%,20.0%和 15.3%,随覆盖度的增加而递减,85—165 mm 高度层的平均土样百分含量为 43.2%,47.8%和 63.0%,呈随覆盖度增加而递增趋势。因此,当覆盖度为 20%,40%和 50%时,风沙流结构出现了变异,输沙率随高度的增加呈现出递减→递增→递减→趋于平缓的态势。以 85 mm 高度层为节点,可用分段函数描述,85 mm 以下遵循多项式函数关系,85 mm 以上遵循指数函数关系(表 1)。这与邢恩德^[18]、刘艳萍等^[17]提出的结论有共同点,即输沙率最大点并未出现在距地表最近处,而随着风速与植被盖度的变化而波动。

分析存有差异原因:该试验中,供试地表是用原位地表扰动土与天然植物模拟而成,土壤颗粒的起动风速低,极易被搬运。当植被覆盖度为一定时,一部分土壤颗粒在挟沙风的作用下获得起动能,在一定高度内与覆盖植物茎叶发生撞击后反弹,再被输送。另一部分土壤颗粒在输送过程中被植被拦截;覆盖度越大拦截的颗粒物越多,总输沙量越小(如图 6 所示)。此外,输沙率的变化集中在距地面 200 mm 内;首先,此区间是跃移颗粒最为活跃的高度;其次,由于

植被对风洞流场产生扰动,在 10 cm 高度附近出现气流紊乱,致使土壤颗粒物被输送至更高更远,覆盖度越大影响越大(表 2)。因此,在 20%,40%,50%覆盖度时,风沙流结构呈递减→递增→递减→趋于平缓的变化态势,并在 85—125 mm 高度内出现了最大输沙率点。综上所述,干枯植被的覆盖可以削弱风对地表土壤的直接作用力,能拦截部分风沙流颗粒;随植被盖度的增大,最大输沙率点上升,使风沙流结构产生了变化,最终达到了抑制风蚀效果,这与相关研究结论吻合^[11-12,16-17]。因有风蚀过程的存在所以有风沙流的出现^[26]。目前,干旱半干旱地区公路不同程度遭受着风沙流危害,后续可综合考虑公路边坡条件、植被盖度、空气动力学粗糙度、气候等因素深入研究,这对保障公路安全畅通,改善生态环境有重要意义。

3.2 结论

通过风洞模拟试验研究得出,输沙率随风速增大而增大,干枯植被覆盖度为 0%时,随高度的增加按指数函数规律递减。覆盖度为 20%,40%,50%时,风沙流结构呈递减→递增→递减→趋于平缓的变化趋势,输沙率在 85 mm 以下按多项式函数规律变化,85 mm 以上按指数函数规律变化。随覆盖度的增大近地表的输沙率递减,而最大输沙率点不断上升,总输沙量减少,且最大抗风蚀效率达 65.73%。因此,干枯植被覆盖度影响公路沿线地表风沙流结构,削弱挟沙风对地表的侵蚀作用力,能有效抑制风蚀沙化现象,保障公路安全运营。

[参 考 文 献]

- [1] 李驰,高瑜.沙漠公路风沙土路基风蚀破坏试验研究[J].岩土力学,2011,32(1):33-38.
- [2] 郝贞洪,刘艳晨,郭健,等.风沙环境下混凝土路面受冲蚀形貌、损伤机理及工况预测[J].中国公路学报,2017,30(9):27-33,50.
- [3] 鱼燕萍,肖建华,屈建军,等.两种典型高等级公路路基断面风沙过程的风洞模拟[J].中国沙漠,2019,39(1):68-79.
- [4] 秦富仓,姚云峰,哈斯巴图,包头.东胜公路沿线荒漠化防治途径研究[J].内蒙古林学院学报,1999(3):55-59.
- [5] 武俊瑛,高永.浑善达克沙地公路机械沙障防风固沙效益分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(12):161-166.
- [6] 高冠龙,张小由,杨凯,等.沙漠地区高速公路防沙效应试验研究,以营双高速公路八步沙段为例[J].水土保持通报,2017,37(2):17-20,26.
- [7] 裴志永,乔敬伟,秦伟,等.穿沙公路沙柳防护带平茬恢复期辅助沙障设置模式优选[J].林业工程学报,2019,4(4):127-134.
- [8] 胡广利,胡大林.陕北水蚀风蚀交错区高速公路建设初期

- 植被恢复模式研究[J].公路,2013,58(11):237-240.
- [9] 张党正,张志强,姚嘉林,等.内蒙古经乌高速公路绿色公路建设探索与实践[J].公路,2021,66(7):176-183.
- [10] 李生字,范敬龙,王海峰,等.蒙古高原交通干线风沙(雪)危害防治技术方案[J].干旱区研究,2021,38(6):1760-1770.
- [11] 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.
- [12] 黄富祥,王明星,王跃思.植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J].植物生态学报,2002,26(5):627-633.
- [13] 吴晓光,姚云峰,迟文峰,等.1990—2015年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征[J].中国农业大学学报,2020,25(3):117-127.
- [14] 王强强,唐进年,杨自辉,等.不同配置固沙林的防风阻沙效果[J].西北林学院学报,2020,35(3):177-184.
- [15] 张奕,肖辉杰,辛智鸣,等.乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):87-96.
- [16] 余沛东,陈银萍,李玉强,等.植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J].中国沙漠,2019,39(5):29-36.
- [17] 刘艳萍,刘铁军,蒙仲举.草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J].中国沙漠,2013,33(3):668-672.
- [18] 邢恩德,马少薇,郭建英,等.植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J].水土保持研究,2015,22(6):331-334.
- [19] 潘高娃.正确认识沙地和沙漠:浑善达克沙地桑根达来地段植被调查[J].环境与发展,2015,27(1):5-12.
- [20] 范贵生.可移动式风蚀风洞设计及其空气动力学性能研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
- [21] 白红梅,李钢铁,马骏骥,等.浑善达克沙地微地形植被特征分析[J].北方园艺,2015(17):53-57.
- [22] 麻硕士,陈智.土壤风蚀测试与控制技术[M].北京:科学出版社,2010.
- [23] 陈智,麻硕士,赵永来,等.保护性耕作农田地表风沙流特性[J].农业工程学报,2010,26(1):118-122.
- [24] 朱朝云,丁国栋,杨明远.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [25] 王仁德,李庆,常春平,等.土壤风蚀野外测量技术研究进展[J].中国沙漠,2019,39(4):113-128.
- [26] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):156-159.

(上接第9页)

- [13] Chamizo S, Yolanda Cantón, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,49:96-105.
- [14] 吴佩瑶,秦富仓,董晓宇,等.坡度影响下的砒砂岩区裸露坡面水分入渗特征及模拟[J].水土保持学报,2022,36(2):64-69.
- [15] Warren S D, Stark L R, Lewis L A, et al. Reproduction and dispersal of biological soil crust organisms [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2019,7:344.
- [16] Sloan P G, Moore I D, Coltharp G B, et al. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds [J]. Water Resources Research, 1984,20(12):1851-1862.
- [17] Li Bai, Gao Jiarong, Wang Xiuru, et al. Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2016,31(4):311-323.
- [18] 刘焕焕,王改玲,殷海善,等.红枣经济林不同植被覆盖土壤水分入渗特征[J].灌溉排水学报,2020,39(4):52-58.
- [19] 丰雪,张阒,李波,等.基于信息熵方法的土壤水分入渗方程试验研究[J].水土保持学报,2017,31(2):57-61.
- [20] Singh V P. Entropy theory for derivation of infiltration equations [J]. Transactions of the Asabe, 2012,46(3):374-381.
- [21] Burgy R H, Luthin J N. Discussion of "A Test of the single-and double-ring types of infiltrometers" [J]. Transactions American Geophysical Union, 1957,38(2):260-261.
- [22] 雷文娟,唐翔宇.土壤水分入渗和再分布过程的信息熵演变特征[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(1):39-45.
- [23] 张侃侃,卜崇峰,高国雄.黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812.
- [24] 吕刚,王婷,王韞策,等.辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):86-92.
- [25] 范严伟,赵文举,王昱.入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J].兰州理工大学学报,2015,41(1):65-70.