

# 高速公路建设中不同边坡风力侵蚀特性

## ——以银武高速公路同心至固原段为例

王晓东<sup>1</sup>, 张洪江<sup>1</sup>, 李 猛<sup>1</sup>, 江玉林<sup>2</sup>, 陈宗伟<sup>2</sup>, 张红丽<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 交通部科学研究院, 北京 100029)

**摘 要:** 为研究高速公路边坡风力侵蚀的规律, 选择银武高速公路同心至固原段为研究区段, 通过 10 个小区的风蚀数据, 对比分析了不同边坡的平均风蚀量, 探讨了不同边坡的侵蚀规律。结果表明, 土壤含水率可以不同程度地减少边坡的平均风蚀量。不同边坡土壤风蚀量有明显的差异, 而且没有任何措施的松散堆积物的土壤风蚀量明显大于其它边坡。六棱砖防护措施防风效益最好, 拱形框架梁防风效益次之, 采用机械压实的办法防风效益最差。在降低土壤风蚀起始风速单方面, 六棱砖相比拱形框架梁和机械压实更有效。

**关键词:** 高速公路建设; 边坡; 风力侵蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)03-0097-05

中图分类号: S157, U417.1

## Characteristics of Wind Erosion on Different Side Slopes in Highway Construction from Tongxin to Guyuan

WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, ZHANG Hong-jiang<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, JIANG Yu-lin<sup>2</sup>, CHEN Zong-wei<sup>2</sup>, ZHANG Hong-li<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083, China; 2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** To study the law of wind erosion on highway side slopes, the highway from Tongxin to Guyuan was selected as an experimental site. The average amount of wind soil in different side slopes was analyzed, and the law of wind erosion on different side slopes was studied based on wind erosion data of ten observation plots. Results showed that soil water content could evidently reduce soil loss by wind on side slope. The amount of soil loss on different side slopes was significantly different, and the amount of soil loss on the dumping ground without any measure adopted was greater than that on other slopes. Effect of hexagon brick was the best in preventing wind erosion, and the second was arch frame-saw. Effect of mechanical press was worst in preventing wind erosion. A correlation between wind erosion intensity and wind speed was founded through analyses. Hexagon brick was more effective than arch frame-saw in lowering initial wind speed.

**Keywords:** highway construction; side slope; wind erosion

近年来我国公路,尤其是高速公路发展迅速,高速公路建设给当地带来经济繁荣的同时,也带来一些生态环境问题,而其中影响较大的就是水土流失问题。尤其在经济相对落后的西部高速公路建设中造成的水土流失后果更为严重。由于高速公路建设中不同边坡水土流失特性不同,增加了水土流失治理难度。国内对西部高速公路建设中水土流失的研究报道较少。针对这一问题对研究区高速公路边坡的水土流失特性进行了初步研究,以期在高速公路水土流失的防治措施规则与布设奠定基础<sup>[1-4]</sup>。

研究区段位于银武高速公路同心至固原段的固原市原州区境内固原立交段 2.5 km 处。银武高速公路同心至固原段地处黄土高原中部,地势南高北低。南为六盘山山地,东北为黄土丘陵,中部为清水河河谷平原。路线主要沿清水河河谷冲积平原由北向南布设,其气候为中温带半干旱大陆性气候,地势较高,冬季为西北高寒气流东下通道,夏季处于东南湿润气流北行之末梢。冬寒长,夏热短,秋凉早,春暖快,年平均气温在 7℃左右,极端最低气温-28.1℃,极端最高气温 34.6℃;干旱少雨,年平均降水量仅有 478

mm;日照充足,蒸发强烈,年平均日照时数为 2518 h;风大沙多,雨雪稀少,年平均风速为 2.7 m/s,最大风速为 28 m/s,风向大多为西北风,大风多发生在 3—5 月,且夹有沙尘,有时会形成沙尘暴;一般地区积雪厚度在 10 cm 左右,局部低凹沟壑地带由于风力作用达 0.7~1.7 m;最大冻深为 1.18 m,自然灾害以旱灾最为频繁。

表 1 观测小区基本情况

小区	水土保持工程措施	钎数	边坡类型	坡度/(°)	坡向/(°)	土壤含水率/%	风蚀物容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	拱形框架梁	16	填料路基	33	东偏北 20	4.32	1.52
2	拱形框架梁	16	填料路基	33	东偏北 20	4.61	1.44
3	六棱砖	16	填料路基	33	北偏东 20	5.67	1.45
4	六棱砖	16	填料路基	33	南偏西 20	3.65	1.33
5	拱形框架梁	16	填料路基	33	西偏南 20	3.22	1.57
6	拱形框架梁	16	填料路基	33	西偏南 20	6.25	1.36
7	机械压实	16	填料路基	33	西偏南 20	4.92	1.54
8	机械压实	16	填料路基	33	西偏南 20	3.10	1.48
9	无措施	16	松散堆积物	35	西	4.26	1.34
10	无措施	16	松散堆积物	35	东	5.34	1.45

## 1.2 研究方法

风蚀物容重测定采用环刀法,对路基填料、公路松散堆积物取样后,在实验室进行测定,结果见表 1。

风速观测采用经校正的手持风速仪,多次测定风速后求其平均值并记录其风速历时,结果见表 2。

表 2 观测期平均风速和历时

观测日期	平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	历时/h
20060327	2.75	24
20060402	6.99	11
20060408	4.81	6
20060411	3.03	24
20060415	8.75	20
20060417	5.61	4
20060422	3.75	15
20060425	6.05	8
20060427	7.43	7

风力侵蚀量观测采用插钎法,在观测小区内观测多点土壤的风蚀厚度,每次风后观测记录风前风后的刻度差值,即为风蚀厚度,然后求其平均值即为平均风蚀厚度。水土保持工程措施对风蚀量影响的显著性分析,主要借助 SPSS10.0 软件,运用单因素方差

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验选择有代表性的公路边坡类型,主要有拱形框架梁、六边形砖、机械压实以及无工程防护措施 3 种,设置 10 个观测场进行土壤侵蚀量的观测,小区基本情况见表 1。

分析法来完成。单因素方差分析的基础是计算数据的组内  $S_S$  组内、组间离差平方  $S_S$  组间,其中  $S_S$  组内代表随机误差,  $S_S$  组间代表不同处理造成的差异,  $S_S$  组内和  $S_S$  组间分别除以各自的自由度得到其均方值  $M_S$  组内和  $M_S$  组间,当  $M_S$  组间/ $M_S$  组内  $\approx 1$  时表明处理没有作用,各样本来自同一总体;当  $M_S$  组间  $\gg M_S$  组内时表明处理确实有作用,各样本来自不同总体。  $M_S$  组间/ $M_S$  组内构成  $F$  分布,用  $F$  值与其临界值进行推断样本是否来自同一总体<sup>[5-6]</sup>。

不同水土保持工程措施下的相对土壤流失率  $E$ ,可用下式计算:

$$E = \frac{A_i}{A_j} \quad (1)$$

式中:  $A_i$  —— 第  $i$  种水土保持工程措施下的风蚀量 ( $t/km^2$ );  $A_j$  —— 无措施下的风蚀量 ( $t/km^2$ )<sup>[7-10]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 风蚀量监测结果

试验期内(2006 年 3 月 27 日—4 月 27 日)依据实验方法和风力情况对 10 个小区的风蚀进行了 9 次观测,其中每场风速和历时结果见表 2。然后通过平均风蚀厚度与土壤容重计算得到小区的平均风蚀量,结果见表 3。

表 3 观测期内小区风蚀量

t/km<sup>2</sup>

日期	小 区									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
—0327	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	106.93	75.63
—0402	237.58	180.14	181.40	124.75	245.39	255.14	385.00	416.32	391.93	453.75
—0408	95.15	90.14	45.39	41.63	98.13	127.57	144.45	185.00	178.18	189.12
—0411	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	106.93	151.01
—0415	380.00	405.07	272.02	291.00	490.63	382.57	481.25	462.50	535.23	491.62
—0417	142.58	180.14	45.39	83.26	98.13	85.00	240.70	185.00	248.41	226.88
—0422	47.58	45.07	0.00	41.63	147.27	127.57	144.45	185.15	106.93	151.37
—0425	190.15	180.14	90.63	124.75	196.41	127.57	336.95	323.82	320.68	264.75
—0427	237.58	270.14	180.96	124.75	196.41	170.14	481.25	416.18	320.68	378.13
合计	1 330.60	1 350.84	815.79	831.77	1 472.37	1 275.56	2 214.05	2 173.97	2 315.90	2 382.26

2.2 不同边坡风蚀量对比

2.2.1 土壤含水量对风蚀量的影响 从表 1 中 5 号和 6 号小区基本情况可见,这 2 个试验小区有着相同的边坡类型和水土保持工程措施,工程措施都采用拱形框架梁,且其规格也基本一致,惟一的差异就是土壤含水率,5 号小区土壤含水率仅为 3.22%,而 6 号小区的土壤含水率达 6.22%,约为 5 号小区的 2 倍。

试验结果表明,6 号小区的平均风蚀量为 1 275.56 t/km<sup>2</sup>,明显小于 5 号小区的 1 472.37 t/km<sup>2</sup>,土壤风蚀量降低了 13.37%。同样,7 号小区和 8 号小区边坡类型和水土保持工程措施完全一致,土壤含水率分别为 4.92%,3.10%,结果也同样表明,7 号小区的平均风蚀量比 8 号小区有所减少。其它几

个类型相似的小区由于土壤含水率差异微小,所以平均风蚀量差异未能表现出来。结果表明在边坡类型和水土保持工程措施相同的情况下,土壤含水率可以不同程度地减少边坡的风蚀量<sup>[11]</sup>。

2.2.2 水土保持工程措施对风蚀量的影响 (1) 水土保持工程措施对风蚀量影响的显著性分析。9 号和 10 号小区与其它小区土壤含水量相当,风蚀物类型也相似,惟一不同的是没有任何水土保持工程措施,因此对边坡平均风蚀量方差分析的结果可以检验水土保持工程措施对平均风蚀量的影响是否有显著差异。通过对风蚀量数据简单的分析后,可知风蚀量近似遵从正态分布,所以可进行方差分析。对 10 个小区风蚀量的方差分析结果见表 4。

表 4 小区风蚀量方差分析结果

变差来源	离差平方和 $S_S$	自由度 $d_f$	均方和 $M_S$	F 值	概率 P 值
组 间	365 518.138	9	40 613.126	2.061	0.043
组 内	1 576 131.736	80	19 701.647		
合 计	1 941 649.874	89			

方差分析结果显示概率 P 值 0.043 < 0.05,表明 10 个小区在 0.05 的显著水平下平均风蚀量有明显的差异。在边坡平均风蚀量方差分析有显著差异的条件下,再将 9,10 号小区的风蚀量与其它 8 个小区的风蚀量进行对比分析,分析结果见表 5。

表 5 风蚀量对比分析结果

对比值	标准误差	T 值	自由度	概率值
751.8671 <sup>①</sup>	147.955 1	5.082	80	0.000

注: ①对比系数的和不为 0。

由表 5 可见,概率值明显小于 0.05,表明 9 号和 10 号小区与其它 8 个小区的平均风蚀量有明显差

异。主要原因正是由于 9 号,10 号小区没有任何水土保持工程措施,属于开挖边坡的松散堆积物,导致风蚀量明显大于其它 8 个小区;而其它 8 个小区均有不同的水土保持工程措施,由此表明水土保持工程措施对减少土壤风蚀量的作用显著。

(2) 不同水土保持工程措施防风蚀效果。由风蚀量结果可知 9 号小区和 10 号小区的平均风蚀总量最大,为了比较不同类型水土保持工程措施的防风蚀效果,将没有任何水土保持工程措施的 9 号小区和 10 号小区风蚀量的平均值 2 349.08 t/hm<sup>2</sup> 作为标准,另外,再由式(1)计算得出小区的相对土壤流失率见图 1。

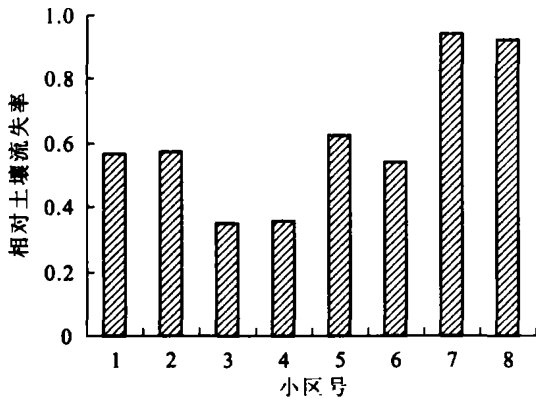


图 1 各小区相对土壤流失率

由图 1 可见, 3 号小区的相对土壤流失率最小, 为 0.347, 表明 3 号小区的防风蚀效益最好。7 号小区的相对土壤流失率最大, 为 0.943, 它的防风蚀效益也就最差。由图 1 还可以看出, 相邻 2 个小区的相对土壤流失率相差不大, 主要是因为相邻小区采用了相同的水土保持工程措施, 如 1 号和 2 号小区都采用了拱形框架梁的防护措施。将 2 个工程措施类型相同的小区合并为一类, 并计算出其平均风蚀量, 得到不同工程措施相对土壤流失率如表 6 所示。

表 6 不同工程措施相对土壤流失率

工程措施	平均风蚀量/(t·km <sup>-2</sup> )	相对土壤流失率
拱形框架梁 A	1 340.72	0.571
六棱砖	823.78	0.351
拱形框架梁 B	1 373.96	0.585
机械压实	2 194.01	0.934

注: 拱形框架梁 A 为 1 号和 2 号小区合并; 拱形框架梁 B 为 5 号和 6 号小区合并。

表 7 平均风蚀强度与风速的相关关系

小区号	相关关系方程	回归系数 R	土壤风蚀起始风速 V <sub>s</sub> /(m·s <sup>-1</sup> )
1	$Q = 26.875 \ln V - 26.767$	R = 0.804 1	2.707
2	$Q = 28.062 \ln V - 27.832$	R = 0.709 9	2.696
3	$Q = 18.853 \ln V - 21.125$	R = 0.874 4	3.066
4	$Q = 16.343 \ln V - 17.632$	R = 0.845 6	2.941
5	$Q = 25.359 \ln V - 24.612$	R = 0.945 7	2.639
6	$Q = 21.023 \ln V - 19.392$	R = 0.887 1	2.515
7	$Q = 44.395 \ln V - 42.983$	R = 0.731 6	2.633
8	$Q = 39.888 \ln V - 37.142$	R = 0.784 0	2.537
9	$Q = 35.481 \ln V - 29.321$	R = 0.717 4	2.285
10	$Q = 36.091 \ln V - 29.810$	R = 0.741 8	2.284

由表 6 可以看出, 工程措施采用六棱砖的相对土壤流失率最小为 0.351, 拱形框架梁次之为, 而机械压实的相对土壤流失率最大为 0.934, 也就是说从防风蚀效果上来说六棱砖工程防护措施最好, 推断其原因为六棱砖防护措施能更好地消减到达坡面风的能量, 而采用机械压实的防风蚀效果最差, 主要是由于边坡填料质地决定了其表层颗粒不能有效地粘结在一起, 从而不能达到降低起沙风速的作用。拱形框架梁 A 和 B 两种类型的相对流失率差异微小。结果表明不同的水土保持工程措施防风蚀效益差异明显。

### 2.3 不同边坡风蚀特性

对 10 个小区观测期内的平均风蚀量和平均风蚀强度分别与风速进行了回归分析计算。结果显示, 平均风蚀量与风速没有明显的相关关系, 主要是因为风速历时也是影响风蚀量的重要因素, 如 10 号小区 4 月 2 日的平均风速 6.99 m/s 虽然小于 4 月 27 日的 7.43 m/s, 但由于 2 日的风速历时更长, 所以平均风蚀量也更大。对平均风蚀强度与风速二者之间关系数据进行分析拟合后, 发现平均风蚀强度与风速存在如式(2)关系。

$$Q = k \ln V - P \quad (2)$$

式中:  $Q$  —— 风蚀强度 [t/(km<sup>2</sup>·h)];  $V$  —— 风速 (m/s);  $k$  —— 方程系数;  $P$  —— 方程常数项。

令式(2)右端等于 0, 此时得到的解  $V_s$  就是小区土壤风蚀的起始风速。当风速小于这一数值时, 土壤不发生风蚀。通过计算得到的土壤风蚀起始风速与实测的起沙风速基本相近, 由于风蚀厚度观测精度所限, 实际土壤风蚀起始风速略大于计算值<sup>[12-13]</sup>。由分析拟合得到平均风蚀强度  $Q$  与风速  $V$  之间的关系式以及各小区的土壤风蚀起始风速  $V_s$  (见表 7)。

由表7可知, 9, 10号小区的土壤风蚀起始风速明显低于其它小区, 主要是因为相比其它小区 9, 10号小区是没有任何工程防护措施的松散堆积物, 结构松散, 抗风蚀性差; 在边坡类型相同的小区, 3, 4号小区的土壤风蚀起始风速明显高于其它小区, 这与3, 4号采用了六棱砖防护措施有很大关系, 1, 2, 5, 6, 7, 8号小区土壤风蚀起始风速基本相当, 这说明在降低土壤风蚀起始风速方面, 六棱砖相比拱形框架梁和机械压实更有效<sup>[14]</sup>。

### 3 结论

在边坡类型和水土保持工程措施相同的情况下, 土壤含水率可以不同程度地减少边坡的平均风蚀量。同为拱形框架梁的填料路基, 6号小区的土壤含水率大约为5号小区的2倍, 而土壤风蚀量也降低了13.37%。

不同边坡的土壤风蚀量有明显的差异, 而且没有任何水土保持工程措施的松散堆积物边坡的土壤风蚀量明显大于有水土保持工程措施防护的边坡。

不同的水土保持工程防护措施防风蚀效果差异明显, 六棱砖防护措施防风效果最好, 拱形框架梁防风效益次之, 采用机械压实的办法防风效益最差。

经分析拟合得到平均风蚀强度与风速之间关系式为  $Q = k \ln V - P$ , 同时还表明在降低土壤风蚀起始风速单方面六棱砖相比拱形框架梁和机械压实更有效。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Scientific Committee on the Water Resources. Water resources research: trends and needs in 1997. Hydro Sci J,

1998, 43(1): 19—46.

- [2] 王飞, 李锐, 杨勤科. 公路建设水土流失与水土保持研究[J]. 公路, 2003(8): 148—152.
- [3] 钟元庆. 山区高速公路水土流失调查分析及保持措施[J]. 公路交通技术, 2003(6): 90—92.
- [4] 张恒喜, 郭基联, 朱家元, 等. 小样本多元数据分析方法及应用[M]. 西北工业大学出版社, 2002.
- [5] 任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析——理论、方法、实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 45—50.
- [6] 蔡新广. 石匣小流域水土保持措施蓄水保土效益试验研究[J]. 资源科学, 2004, 26: 144—150.
- [7] 张贤明, 董文达, 李德荣, 等. 江西红壤坡地果园水土保持措施效益之研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 102—104.
- [8] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁. 南方红壤坡地不同水土保持措施消流减蚀效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(4): 624—628.
- [9] 范兴科, 蒋定生, 黄国俊. 黄土高原坡耕地水土保持措施效益评价试验研究[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 1—6.
- [10] 穆兴民, 陈霁伟. 黄土高原水土保持措施对土壤水分的影响[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 39—44.
- [11] 符素华, 吴敬东, 段淑怀, 等. 北京密云石匣小流域水土保持措施对土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 21—24.
- [12] 张洪江, 王礼先. 花岗岩坡面土壤流失特性及其系统动力学仿真[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997. 15—19.
- [13] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope Gradient Effect on Soil Loss for Slopes[J]. Transactions of the A S A E, 1994, 37(6): 1835—1840.
- [14] 段喜明, 王治国. 朔黄铁路山西段水土流失预测及治理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学, 1999, 5(6): 71—75.