

砾石覆盖对抑制旱作农田土壤风蚀效果的风洞模拟

孙悦超¹, 麻硕士², 陈智^{2*}, 赵永来¹, 苏洁¹, 冬梅²

(1. 内蒙古农业大学职业技术学院, 包头 014109; 2. 内蒙古农业大学机电工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 针对中国阴山北麓旱作农田风蚀比较严重的现实, 将旱作农田地表铺设不同覆盖度和粒径的砾石后进行风洞试验, 旨在探索砾石覆盖度和粒径在抑制旱作农田土壤风蚀效果方面的作用, 为采取合理的防风蚀措施提供技术依据。利用野外风洞原位测试方法, 完成了6种风速下对应净风和挟沙风时的不同砾石粒径和覆盖度下的旱作农田土壤风蚀测试。结果表明: 无论净风还是挟沙风, 增加砾石覆盖度, 旱作农田抗风蚀效率均提高, 但当砾石覆盖度超过28%后, 其对提升抗风蚀效率作用不大; 在相同覆盖度下, 随砾石粒径的增加, 输沙量、抗风蚀效率略有变化, 但不明显; 将耕作农田地表铺设砾石, 不仅能获得较好的防风蚀效果, 同时利于农业耕作, 该方法成本低, 简单可行, 是适合阴山北麓地区气候环境特点的防治旱作农田土壤风蚀的有效方法。

关键词: 旱作农田, 砾石, 风洞, 抗风蚀效率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.027

中图分类号: S157.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0151-05

孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 砾石覆盖对抑制旱作农田土壤风蚀效果的风洞模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 151-155.

Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Wind tunnel simulation of impact of gravel coverage on soil erosion in arid farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 151-155. (in Chinese with English abstract)

0 引言

砾石覆盖地表是防治风沙危害的主要工程措施之一, 其抑制风蚀机理在于增加地表粗糙度, 吸收和分解地表风动量, 降低可蚀床面上的剪切力。另外, 覆盖砾石还可减少风和地表土壤的直接作用面积, 对地表形成保护。在中国西北防沙材料比较缺乏的荒漠地区, 常用砾石压沙措施固定沙丘和防止风沙活动^[1-2]。砾石覆盖防治土壤风蚀有代表性的研究成果反映在董治宝、刘连友等人的论文中^[3-6], 而关于砾石覆盖旱作农田防治土壤风蚀的研究资料在国内尚未见。目前, 旱作农田防风蚀研究主要侧重于防护林、带状间作、保护性耕作等方面^[7-12]。为此, 选择北方风蚀比较严重的阴山北麓地区, 利用可移动式风蚀风洞对砾石覆盖传统旱作农田地表进行抗风蚀效应测试研究, 测定同一风蚀过程中输沙量、抗风蚀效率与砾石粒径和覆盖度的关系, 旨在探索砾石覆盖度和粒径对旱作农田防风蚀效果的影响, 为该区防治旱作农田土壤风蚀采取合理技术措施提供依据。

1 研究区概况

试验地选择在内蒙古自治区武川县保护性耕作项目示范区东侧的一片传统旱作农田区域内。该区位于内蒙

古中部、阴山北麓, 风蚀沙化严重, 是中国农牧交错带中经济最贫困区之一, 又是受荒漠化威胁最严重的地区之一。春季干燥、季风强烈, 夏季短促、降雨偏少, 冬季严寒、时间漫长。年平均气温 2.5℃, 降水量 360 mm 左右, 无霜期 105 d 左右, 年积温 2 100℃。年蒸发量高达 1 848.3 mm, 是年降水量的 5 倍多。大于 17 m/s 的大风日数在 30 d 左右, 风大沙多是该地区冬春季的典型特征^[13-15]。在干旱多风的沙质地表条件下, 人为活动的加剧和每年较多的大风天气, 导致了以风蚀为主要标志的土地退化格局, 有些农民因土壤侵蚀和沙化过重不得不背井离乡, 沦为“生态难民”。

2 测试设备与方法

2.1 测试设备

主要测试设备为内蒙古农业大学研制的 OFDY-1.2 型直流吹气式可移动风蚀风洞。风洞全长 11.8 m, 由过渡段、整流段、收缩段和试验段组成, 其中试验段为无底矩形截面, 长 7.2 m、宽 1 m、高 1.2 m, 经鉴定符合低速风洞设计要求。风速范围在 0~20 m/s 连续可调, 风速由皮托管和风速廓线仪采集后通过微压差传感器和数据采集卡传给以 LabWindows/CVI (C for virtual instruments) 作为平台开发的数据采集软件, 并显示、记录、保存于计算机中, 风速廓线仪置于距风洞出口 1.8 m, 距洞壁 0.3 m 处。风蚀物用旋风分离式集沙仪收集, 放置在风洞轴线距出口 1 200 mm 处, 高 840 mm, 沿高度方向分布 10 个气流管, 通过气流管收集垂直方向上 10 个不同高度的风蚀物。风蚀物由精度为千分之一的电子天平称质量, 仪器设备布置如图 1 所示。

收稿日期: 2009-12-02 修订日期: 2010-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40861013)

作者简介: 孙悦超 (1974-), 副教授, 博士, 主要从事农业工程和土壤风蚀测试与控制研究。包头 内蒙古农业大学职业技术学院, 014109。

Email: yuechaosun@sina.com

*通信作者: 陈智 (1962-), 工学博士, 主要从事工程测试和风蚀荒漠化防治研究, 呼和浩特 内蒙古农业大学机电工程学院, 010018。

Email: chz6653@sohu.com

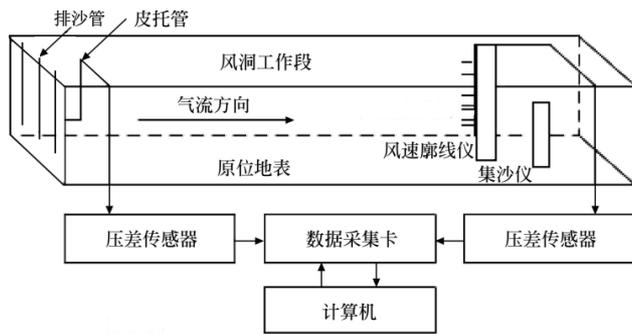


图1 试验系统示意图

Fig.1 Diagram of test system

2.2 测试方法

试验时间选择在土壤风蚀最为严重的4月份进行。被测地表为秋收后用铧式犁翻耕的传统耕作农田，近地表5 cm内土壤平均含水率为2.3%，土壤颗粒机械组成情况见表1。由表1可知，粒径为1 mm以上的砂砾含量最多，占29.27%；沙粒（粒径为 $>0.05\sim 1\text{mm}$ ）含量占57.18%；粉粒（粒径为 $>0.002\sim 0.05\text{mm}$ ）和黏粒（粒径小于 0.002mm ）的含量最低，只占13.55%，从土壤机械组成来看其抗风蚀能力较弱。

表1 旱作农田地表土壤颗粒分布
Table 1 Soil distribution of arid farmland

粒径/mm	百分比/%	粒径/mm	百分比/%
>1	29.27	$>0.05\sim 0.1$	18.32
$>0.25\sim 1$	26.43	$>0.002\sim 0.05$	11.77
$>0.1\sim 0.25$	12.43	≤ 0.002	1.78

被测地表耙平后，将可移动式风蚀风洞放置在3种不同砾石粒径且分别对应3种不同覆盖度的传统旱作农田地表上进行试验。为叙述方便，本文将3种不同粒径砾石，按粒径由小到大分别记为：小粒径、中粒径、大粒径。砾石近似卵形，平均尺寸特征参数见表2，每种粒径均铺设成14%、28%、42% 3种盖度。另外取一同类农田地表不铺设砾石做比较试验。试验分净风和挟沙风2种

表3 旱作农田不同砾石盖度和粒径下的输沙量

Table 3 Sediment transport quantity under different coverage and size of gravel of arid farmland

风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	小粒径覆盖度/%			中粒径覆盖度/%			大粒径覆盖度/%			无砾石覆盖	
	14	28	42	14	28	42	14	28	42		
净风	6	0.05	0.03	0.01	0.07	0.02	0.01	0.06	0.02	0.01	0.07
	8	0.14	0.09	0.05	0.15	0.08	0.06	0.14	0.07	0.07	0.16
	10	0.72	0.48	0.37	0.76	0.47	0.41	0.76	0.45	0.27	0.86
	12	1.94	1.36	0.98	1.89	1.33	0.97	2.07	1.27	0.99	2.13
	14	3.27	2.42	2.17	3.25	2.54	2.14	3.43	2.47	2.12	3.53
	16	4.41	3.66	3.41	4.51	3.65	3.34	4.32	3.68	3.49	5.60
	合计	10.53	8.04	6.99	10.63	8.09	6.97	10.78	7.96	6.95	12.35
挟沙风	6	1.04	0.74	0.41	0.81	0.76	0.43	0.77	0.61	0.32	1.07
	8	8.50	2.99	2.86	8.85	2.58	3.09	6.98	2.61	2.94	9.93
	10	14.88	8.74	5.67	14.54	6.55	5.46	14.14	5.52	5.70	19.28
	12	21.60	14.54	11.80	20.8	11.02	11.43	21.96	11.46	11.45	29.30
	14	25.21	19.03	14.76	25.36	17.58	15.09	25.88	16.41	15.15	36.11
	16	29.54	22.19	18.35	29.94	22.43	18.06	30.63	21.75	17.94	42.57
	合计	100.77	68.23	53.85	100.30	60.92	53.56	100.36	58.36	53.50	138.26

情况进行，在每一地表上分别选择风洞中心风速为6、8、10、12、14、16 m/s，共6个风速进行测试，吹蚀时间统一为10 min。净风是在风洞试验时，排沙器不工作，由风洞风机产生风力直接吹蚀被测地表。而挟沙风则是在风洞试验时，由排沙器通过排沙管向风洞入口距地面15 cm处均匀排沙，使气流中含有一定的颗粒沙尘，使其更接近实际沙尘天气。排沙管位置如图1，所加沙土为农田地表土经孔径为0.5 mm的筛子筛分后得到的，每种风速下10 min的排沙量是1 404 g。排沙器排沙量是根据武川县农机推广站的风蚀监测项目数据确定的。

表2 砾石尺寸特征参数

Table 2 Gravel size characteristic parameters

尺寸参数	长轴×短轴/($\text{cm}\times\text{cm}$)	高度/cm
小粒径	6×8	3
中粒径	8×11	6
大粒径	9×15	9

3 结果与分析

3.1 输沙量分析

被测地表在不同风速下，各砾石粒径和不同覆盖度下的净风、挟沙风输沙量测试结果如表3所示。由表3数据可看出，无论净风还是挟沙风，每一粒径下不同砾石盖度的农田地表输沙量随风速的增加均增加，风速越高输沙量增幅越大。但在相同的风速和粒径下，随砾石覆盖度的增加输沙量明显降低，说明增加砾石覆盖度可以有效抑制旱作农田土壤风蚀过程。这是由于砾石覆盖度增大，降低了近地表风速，减小了风对地面的切应力；另外，地表有砾石覆盖，降低了风与地表土壤的直接接触面积，起沙土壤面积减少，因此输沙量相应减少^[16-17]。比较相同砾石覆盖度、粒径不同时输沙量的数据可以看出，3种粒径砾石在14%、28%、42%，3种盖度下，随砾石粒径的增加输沙量略有变化，但与不同覆盖度下的输沙量相比，变化不大。说明砾石粒径对输沙量的影响不如砾石覆盖度明显。

3.2 抗风蚀效率分析

将传统旱作农田(0 盖度)在各级试验风速下的输沙量作为基准输沙量, 由于覆盖砾石后具有抗风蚀作用, 输沙量会有不同程度的减少。将输沙量的减少量占基准输沙量的比值称为砾石覆盖旱作农田的抗风蚀效率。通过计算砾石覆盖旱作农田的抗风蚀效率, 定量评价旱作

农田覆盖砾石后的抗风蚀效果。

计算得到砾石覆盖旱作农田地表的抗风蚀效率情况如表 4。因为 6 m/s 风速时, 土壤风蚀极微弱, 刚刚起沙, 不必计算其抗风蚀效率。由表 4 可以看出, 在每一砾石盖度下, 抗风蚀效率随风速的增加没有一致的变化规律, 但多数情况随风速的增加抗风蚀效率总体上呈下降的趋势。

表 4 砾石覆盖旱作农田的抗风蚀效率
Table 4 Anti-wind erosion efficiency of arid farmland with gravel coverage

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	小粒径覆盖度/%			中粒径覆盖度/%			大粒径覆盖度/%			%
	14	28	42	14	28	42	14	28	42	
	净风	8	12.50	43.75	68.75	6.25	50.00	63.41	12.5	
	10	16.28	44.17	56.98	11.63	45.35	52.33	11.63	47.67	68.61
	12	8.92	36.15	53.99	11.27	37.56	54.46	2.82	40.38	53.52
	14	7.37	31.45	38.53	7.93	28.05	39.38	2.83	30.03	39.94
	16	21.25	34.64	39.11	19.46	34.82	40.36	23.04	34.29	37.68
	平均值	13.26	38.03	51.47	11.31	39.16	49.99	10.56	41.72	51.20
挟沙风	8	14.40	69.89	71.20	10.88	74.02	68.88	29.71	73.72	70.39
	10	22.82	54.67	70.59	24.59	66.03	71.68	26.66	71.37	70.44
	12	26.28	50.38	59.73	29.01	62.39	60.99	25.05	60.89	60.92
	14	30.19	47.30	59.12	29.77	51.32	58.21	28.33	54.56	58.04
	16	30.61	47.87	56.89	29.67	47.31	57.58	28.05	48.91	57.86
	平均值	24.86	54.02	63.51	24.78	60.21	63.47	27.56	61.89	63.53

注: 抗风蚀效率为以传统旱作农田(无覆盖)的输沙量为基准输沙量, 其他处理的输沙量地减少量与基准输沙量的比值。

由不同粒径和覆盖度下的砾石覆盖传统旱作农田在各级风速下抗风蚀效率的平均值可知, 3 种不同粒径砾石在相同盖度下的抗风蚀效率, 无论净风还是挟沙风, 其与砾石粒径的变化关系不大。说明砾石粒径对抗风蚀效率的影响程度很小, 在抑制土壤风蚀过程中所起的作用微弱。在各粒径下随砾石覆盖度的增加, 其抗风蚀效率明显上升: 在净风下, 当砾石覆盖度由 14% 提高到 28% 时, 抗风蚀效率平均值由 11.71% 增加到 39.64%, 增加了 27.93 个百分点, 增加幅度很大。当砾石覆盖度由 28% 提高到 42% 时, 抗风蚀效率增加了 11.34 个百分点。挟沙风时, 当砾石覆盖度由 14% 提高到 28% 时, 抗风蚀效率平均值由 25.73% 增加到 58.71%, 增加了 32.98 个百分点, 增加幅度和净风时一样也很大。当砾石覆盖度由 28% 提高到 42% 时, 抗风蚀效率平均值由 58.71% 增加到 63.50%, 抗风蚀效率只增加 4.79 个百分点。

综上所述, 增加砾石覆盖度可使传统旱作农田地表抗风蚀效率提高, 对减少和抑制其风蚀有重要作用。基本不受砾石粒径的影响, 覆盖度由 14% 增加到 28% 时, 旱作农田地表抗风蚀效率大幅提高, 输沙量迅速下降; 砾石覆盖度由 28% 提高到 42% 时, 抗风蚀效率进一步提升, 但幅度较小。说明 28% 的砾石覆盖度可有效抑制传统旱作农田风蚀, 若进一步增加砾石覆盖度, 抗风蚀效果增加不明显, 但会增加经济投入。所以 28% 左右的砾石覆盖度是有效抑制传统旱作农田地表风蚀比较合适的覆盖度。

4 结 论

无论净风还是挟沙风, 砾石覆盖传统旱作农田地表输沙量随风速的增加均增加, 风速越高输沙量增幅越大。在相同风速和砾石粒径下, 随砾石覆盖度的增加输沙量明显降低, 增加砾石覆盖度可以有效抑制旱作农田土壤的风蚀过程。

增加覆盖度可使传统旱作农田地表抗风蚀效率提高。但砾石覆盖度超过 28% 后, 再增加覆盖度其抗风蚀效率提升幅度较小, 约 28% 的砾石覆盖度是有效抑制该区传统旱作农田土壤风蚀比较合适的覆盖度。

在相同覆盖度下, 随砾石粒径的增加, 输沙量、抗风蚀效率都略有变化, 但不明显。所以, 试图通过增大砾石粒径的办法来提高传统旱作农田的抗风蚀效果并不理想。

内蒙古阴山北麓地区气候干寒, 多大风, 植被生长期短, 旱作农田一年绝大部分时间处于裸露的休闲期, 地表植被覆盖差, 土壤风蚀严重。将传统旱作农田地表铺设 28% 左右的砾石覆盖度不仅可获得较好的防风蚀效果, 还可节省经济投入, 同时利于农业耕作。该方法成本低, 简单可行, 是适合阴山北麓地区自然气候环境防治旱作农田土壤风蚀的一种有效方法。

[参 考 文 献]

- [1] 韩致文, 王涛, 董家宝, 等. 风沙危害防治的主要工程措施及其机理[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 13-21.

- Han Zhiwen, Wang Tao, Dong Zhibao, et al. Main engineering measurements and mechanism of blown sand hazard control[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(1): 13—21. (in Chinese with English abstract)
- [2] 董治宝, 王涛, 屈建军. 100 a 来沙漠科学的发展[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 1—5.
- Dong Zhibao, Wang Tao, Qu Jianjun. The history of desert science over the last 100 years[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [3] Dong Zhibao, Wang Hongtao, Liu Xiaoping, et al. A wind tunnel investigation of the influences of fetch length on the flux profile of a sand cloud blowing over a gravel surface[J]. *Earth Surf, Process, Landforms*, 2004, 29: 1613—1626.
- [4] 董治宝, 高尚玉, Fryrear D W. 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(2): 7—11.
- Dong Zhibao, Gao Shangyu, Fryrear D W. Drag measurement of standing vegetation-clod cover surface[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 7—11. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘连友, 刘玉璋, 李小雁, 等. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(1): 60—62.
- Liu Lianyou, Liu Yuzhang, Li Xiaoyan, et al. Effect of gravel mulch restraining soil deflation by wind tunnel simulation[J]. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(1): 60—62. (in Chinese with English abstract)
- [6] 薛娴, 张伟民, 王涛. 戈壁砾石防护效应的风洞实验与野外观测结果[J]. *地理学报*, 2000, 55(3): 375—383.
- Xue Xian, Zhang Weimin, Wang Tao. Wind tunnel experiments on the effects of gravel protection and problems of field surveys[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 375—383. (in Chinese with English abstract)
- [7] 妥德宝, 赵沛义, 段玉, 等. 以作物残茬为生物篱在裸露农田营建防风带技术的研究[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(10): 167—170.
- Tuo Debao, Zhao Peiyi, Duan Yu, et al. Technique of windbreak construction in bare fields using crop stubble fences[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(10): 167—170. (in Chinese with English abstract)
- [8] Hupy J P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate[J]. *Arid Envir*, 2004, 58(2): 167—179.
- [9] 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 27(12): 1—5.
- Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Test and analysis of wind erosion of land surface soil in arid and semi-arid regions in north areas of Yinshan Mountain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(12): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
- Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 118—122. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孙悦超. 内蒙古后山地区不同地表覆盖条件下土壤抗风蚀效应测试研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- Sun Yuechao. Test Research on Soil Resistance to Wind Erosion Effect in the Different Surface Coverage in Houshan Area of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [12] 臧英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 56—60.
- Zang Ying, Gao Huanwen, Zhou Jianzhong. Experimental study on soil erosion by wind under conservation tillage[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2): 56—60. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
- Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Effect elements research on anti-wind erosion of conservation tillage farmland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 156—159. (in Chinese with English abstract)
- [14] 信乃谄. 中国北方旱农区域治理与发展[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1997: 86—88.
- [15] 王永, 赵举, 程玉臣. 阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. *华北农学报*, 2005, 20(专辑): 57—60.
- Wang Yong, Zhao Ju, Cheng Yuchen. Analysis of wind erosion climatic erosivity at agri-pasture transition zone in north area of yinshan mountain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(album): 57—60. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄翠华, 王涛, 张伟民, 等. 沙质地表与砾质戈壁风沙运动对比研究[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(4): 556—562.
- Huang Cuihua, Wang Tao, Zhang Weimin, et al. Contrastive study on sand drift movement over sand and gravel gobi desert in extremely arid regions[J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(4): 556—562. (in Chinese with English abstract)
- [17] Jordan S, Borak, Michael F, Jasinski, Richard D, Crago. Time series vegetation aerodynamic roughness fields estimated from moths observations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135(8): 252—268.

Wind tunnel simulation of impact of gravel coverage on soil erosion in arid farmland

Sun Yuechao¹, Ma Shuoshi², Chen Zhi^{2*}, Zhao Yonglai¹, Su Jie¹, Dong Mei²

(1. Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014109, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: In view of the serious impact of wind erosion for arid farmland in the northern foot of Yinshan Mountain of China, wind erosion simulation was made in arid farmland surface by laying gravel in different coverage and particle size. In order to providing technical basis for taking reasonable wind erosion preventing measures, it was explored for the effect on inhibition of gravel coverage and particle size on farmland soil wind erosion. Arid farmland soil erosion test was made in the 6 kinds of net wind and sand-driving wind with different gravel size and coverage. Whether net wind or sand-driving wind, it is showed that the anti-wind erosion efficiency of arid farmland will be improved by increasing gravel coverage. When the gravel coverage is exceeding 28%, it will have less effect on anti-wind erosion to increase coverage. In the same coverage, when the gravel size is increased, sediment discharge and anti-wind erosion efficiency will change slightly. Tillage farmland laid gravel can obtain good effect on not only preventing erosion, but also farming. The method is low-cost, simple and feasible. And this method is suitable for northern foot of Yinshan Mountain region climate characteristic, and is an effective way for arid farmland soil erosion prevention.

Key words: arid region farmland, gravel, wind tunnels, anti-wind erosion efficiency