

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.027

杨小亮, 靳正忠, 丁刚, 等. 结皮量与含水率对尾矿风蚀影响的风洞模拟研究. 土壤, 2022, 54(5): 1085–1092.

结皮量与含水率对尾矿风蚀影响的风洞模拟研究^①

杨小亮^{1,2,3}, 靳正忠^{1,2,3*}, 丁刚⁴, 俞祥祥^{1,3,5}, 王海峰^{1,3,5}

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830011; 2 中国科学院新疆生态与地理研究所塔克拉玛干沙漠研究站, 新疆库尔勒 841000; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 新疆维吾尔自治区应急管理厅风险监测和综合减灾处, 乌鲁木齐 830011; 5 中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站, 新疆石河子 832056)

摘要: 尾矿风蚀是影响周边环境空气质量和人体健康的重要因素。以喀拉通克铜镍矿加瓦尔尾矿库尾矿为研究对象, 通过风洞试验, 对不同风速、含水率和结皮量条件下的尾矿风蚀率、风蚀颗粒释放特征进行研究。结果表明: 尾矿风蚀率、风蚀颗粒量及其碰撞能量随着试验风速的增加而增加, 随着尾矿含水率和结皮量的增加而减小。首次出现颗粒碰撞的风速随着尾矿含水率和结皮量的增加而增加。尾矿风蚀颗粒主要分布在 3 cm 高度内, 占总风蚀颗粒的 50% 以上。在结皮不被吹破的情况下, 结皮的抗风蚀效果要优于含水率。因此, 结皮抗风蚀效果与风速和结皮量有关, 10 m/s 以下风速任何结皮量均能有效抗风蚀, 12 m/s 需 25 g 以上结皮量, 14 m/s 需 50 g 以上结皮量; 而含水率在任何试验风速下需达到 2.72% 以上才有较好的抗风蚀效果。

关键词: 结皮量; 含水率; 尾矿; 风蚀; 风洞试验

中图分类号: X53 文献标志码: A

Wind Tunnel Simulation of Effects of Crust Quantity and Moisture on Wind Erosion of Tailings

YANG Xiaoliang^{1,2,3}, JIN Zhengzhong^{1,2,3*}, DING Gang⁴, YU Xiangxiang^{1,3,5}, WANG Haifeng^{1,3,5}

(1 National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2 Taklimakan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Korla, Xinjiang 841000, China; 3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 Office of Risk Monitoring and Comprehensive Disaster Reduction, Department of Emergency Management of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China; 5 Mosuowan Desert Research Station, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Shihezi, Xinjiang 832056, China)

Abstract: Wind erosion of tailings is an important factor affecting ambient air quality and human health. In this study, the tailings of copper-nickel tailings pond are taken as the research object, and the effects of wind speed, crust quantity and moisture on the characteristics of wind erosion rate and wind erosion particles of tailings were studied by wind tunnel experiment. The results show that the wind erosion rate, wind erosion particles and collision energy of tailings increase as the wind speed increases, but decrease with the increase of moisture and crust quantity of tailings. The wind speed of first particle collision increases with the increase of moisture and crust quantity of tailings. Wind erosion particles of tailings are mainly concentrated within 3 cm height, accounting for more than 50% of the total wind erosion. Under the condition that the crust is not broken by the wind, crust quantity has the better resistance to wind erosion than moisture. Therefore, wind erosion resistance of crust is related to wind speed and crust quantity. Any crust quality can effectively resist wind erosion at wind speed below 10 m/s, but more than 25 g and 50 g crust are required to resist wind erosion at wind speed of 12 m/s and 14 m/s, respectively. Moisture of tailings should higher than 2.72% for better wind erosion resistance under the experimental wind speed.

Key words: Crust quantity; Moisture; Tailings; Wind erosion; Wind tunnel experiments

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802903, 2018YFC1802906)资助。

* 通讯作者(jinzz@ms.xjb.ac.cn)

作者简介: 杨小亮(1995—), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 主要研究方向为尾矿库及周边环境修复。E-mail: yangxiaoliang19@mails.ucas.ac.cn

风蚀是在风力作用下地表物质被释放搬运的过程,是我国西北干旱区最主要的地表侵蚀类型^[1-2]。风蚀一方面使地表物质被搬运,破坏土壤理化性质,使土壤养分流失,造成土地荒漠化;另一方面风蚀释放的地表颗粒物进入大气,造成环境污染及沙尘暴的频发^[3-4]。研究表明^[5-6],风蚀主要与土壤自身物理特性、下垫面及环境状况有关,包括土壤含水率、土壤机械组成、土壤团聚体、地表覆盖度、地表紧实度、环境风速、环境湿度等。目前,国内外学者主要进行农田、退化草地、固定半固定沙漠等土壤的风蚀研究,关注于风蚀率及颗粒分布,风蚀过程及动力机制,风蚀影响因子及模型,抗风蚀措施及效果等方面,取得了较多研究成果^[7-15]。但对于大量存在的矿业废弃尾矿风蚀及其颗粒释放研究较少。尾矿是矿业生产过程中的产物,是重要的沙尘源和环境污染源^[16]。尾矿无论是干式排放、湿式排放还是膏体式排放,所形成的尾矿库都会对周边土壤及地下水造成不同程度的污染^[17],同时尾矿库干涸后形成的干滩在风力作用下会产生尾矿风蚀。尾矿风蚀颗粒表面极为粗糙,含有原子价不饱和的离子,人若过量吸入,会导致病患,尾矿风蚀也是造成环境空气质量恶化的局部污染源之一^[18-19]。因此,尾矿风蚀对环境空气质量和人体健康的影响绝对不能低估^[3],其风蚀率及颗粒释放特征等研究是尾矿风蚀及其相关防治研究的基础。研究结果有助于尾矿采取有效的防护措施,控制尾矿风蚀污染。

为了解尾矿风蚀特征及其对环境的影响,合理采取防治措施,本文通过风洞试验对西北干旱区尾矿风蚀特征进行研究,探讨不同风速下含水率和结皮量对尾矿风蚀的影响,研究结果对于揭示我国西北干旱区尾矿风蚀及其颗粒释放规律,拓展我国风蚀研究内容,探索我国西北干旱区尾矿风蚀防护措施具有重要意义,并可为科学制定尾矿库风蚀防护措施等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究所用尾矿采自于喀拉通克铜镍矿加乌尔尾矿库,该尾矿库位于新疆富蕴县西南 25 km(89°41'E, 46°48'N, 海拔 931 m)。尾矿库所在区域属于典型的干旱大陆性气候,夏季炎热干旱,冬季严寒少雪,根据当地气象资料显示:该区年平均气温 2.86 °C,负温期长达 5 个月(11 月至次年 3 月),年最高温集中在 7—8 月;年平均相对湿度为 64%;年平均降水量 195.8 mm,多集中在 5—10 月,有效降水量为

41.6 mm,年蒸发量 1 960.6 mm;春末夏初多风,风向以西北、东北为主,年平均风速 2.7 m/s。

尾矿库附近地形平缓,植被较少且以骆驼刺为主。库内尾矿表层在干涸过程中会逐渐固化,形成一层结构松散但盖度较高的物理结皮。库内尾矿化学成分主要以 SiO₂、Al₂O₃、MgO、Fe 为主,含量约为 76.58%。库内尾矿表层物质机械组成(表 1)不仅含少量黏土(1.63%)等细颗粒,还含有大量中沙(11.01%)及以上粗颗粒,但主要以极细沙和细沙为主,含量分别为 30.92% 和 30.50%,其次为粗粉沙,含量 15.30%。平均粒径 3.349 φ(0.098 mm),属于极细沙,分选性较差,属于正偏窄峰态。

表 1 尾矿机械组成
Table 1 Particle size composition of tailing

粒度参数		粒级级配	
参数	数值	级配标准	含量(%)
平均粒径 ^①	3.349 ± 0.138	黏土(<3.9 μm)	1.630 ± 0.259
平均粒径 ^② (mm)	0.098 ± 0.009	极细粉沙 (3.9 ~ 7.8 μm)	1.633 ± 0.163
分选系数	1.310 ± 0.009	细粉沙 (7.8 ~ 15.6 μm)	2.693 ± 0.319
峰度	1.200 ± 0.024	中粉沙 (15.6 ~ 31.0 μm)	5.867 ± 0.663
偏度	0.235 ± 0.016	粗粉沙 (31.0 ~ 62.5 μm)	15.300 ± 1.560
		极细沙 (62.5 ~ 125 μm)	30.920 ± 1.719
		细沙 (125.0 ~ 250.0 μm)	30.500 ± 1.562
		中沙 (250.0 ~ 500.0 μm)	11.007 ± 2.809
		粗沙 (500.0 ~ 1 000.0 μm)	0.450 ± 0.349

注: ①由 Folk-Ward 图解法计算而得; ②由公式 $b=2^{-a}$ 计算得到, 式中 a 为平均粒径①。粒级级配含量为体积百分含量。

1.2 试验设计

1.2.1 样品采集与处理 于 2019 年 6 月在尾矿干滩上随机采集 6 处 50 cm × 50 cm, 表层 20 cm 的尾矿样品, 分别装入样品箱, 带回室内进行风洞试验及粒度分析。

粒度分析在中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠环境与生态修复实验室完成, 采用 BT-2001 型激光粒度分布仪(湿法), 分析结果以体积百分含量表示, 根据 Wentworth^[20]对粒级的划分标准统计了尾矿样品的颗粒级配, 并根据 Folk-Ward 图解法^[21]计算粒度参数(平均粒径 M_z 、分选系数 σ_1 、峰度 K_G 、偏度 Sk_1)。

风洞试验前将采集的 6 处尾矿样品混合均匀, 晾干, 过 2 mm 筛, 去除杂质备用。由于所研究尾矿为

湿式排放, 结皮为物理结皮, 因此本试验采用混合法制备尾矿含水, 喷水法制备尾矿结皮。由混合法和喷水法制备的样品含水和结皮情况与尾矿库排放的湿式尾矿及其干涸后形成的结皮较为相似, 还原度较高, 具有良好的代表性。

含水率制备方法: 试验设置 4 个含水率梯度, 分别为对照组、2%、3%、4%, 对照组为自然晾干样品, 含水率 0.3%, 其余每个梯度准备足够量的晾干样品, 并根据样品量计算所需水量(试验用水为自来水), 将计算好的水量分别加入各样品中, 混合均匀, 密封保存并静置 12 h。试验前将各梯度样品装入长 57 cm、宽 37 cm、深 5 cm 的沙盘中, 铺满、表面刮平, 并重新测量含水率, 真实含水率梯度为 1.74%、2.72%、3.57%。含水率测量采用烘干法, 温度控制在 120 °C, 恒温烘干 8 h。

结皮制备方法: 试验设置 4 个结皮量梯度, 分别为对照组, 25、50、100 g, 对照组为自然晾干样品, 结皮量 0 g。试验前将自然晾干的样品装入长 57 cm、宽 37 cm、深 5 cm 的沙盘中, 铺满、表面刮平, 然后均匀喷洒相应水量, 静置并晾干, 晾干后的沙盘表面会形成一层均匀的物理结皮, 但由于喷洒水量不

同, 形成的结皮厚度及硬度不同, 然而结皮厚度及硬度不易测量且误差较大, 因此, 本文以喷洒的水量来量化结皮梯度。

1.2.2 风洞试验设计 风洞试验于 2019 年 8 月在中国科学院新疆生态与地理研究所环境风洞实验室(位于莫索湾沙漠研究站)完成。该风洞为直流开口吹气式, 全长 16.2 m, 实验段长 8 m, 截面宽 1.3 m, 高 1 m, 采用侧壁扩散式结构, 每侧壁扩散角 0.2°, 风速 0~20 m/s 可调。尾矿库年平均风速 2~3 m/s, 起沙风大多分布在 6~16 m/s, 因此试验设置风速梯度为 8、10、12、14 m/s, 每个梯度样品分别用 8、10、12、14 m/s 的风速吹蚀 30、15、7、3 min。

将制备好的沙盘放入风洞实验段中段中轴线上, 沙盘下风向 5 cm 处放置 2 个梯度集沙仪, 用以测量风蚀颗粒分布; 1 个美国 Sensit H14-LIN 型风蚀传感器, 用以测量风蚀颗粒碰撞数和碰撞能量; 1 个美国 014A 型风速传感器, 用以记录实时风速^[22-23]。梯度集沙仪高度 20 cm, 共 20 层, 每层开口 1 cm×1 cm。风蚀传感器和风速传感器同步贴地测量, 数据采集和记录频率为 1 s, 采集器 CR1000 自动记录。试验布设如图 1 所示。每个沙盘试验前后用精度 1 g 的电子秤称重, 用以计算样品风蚀率。

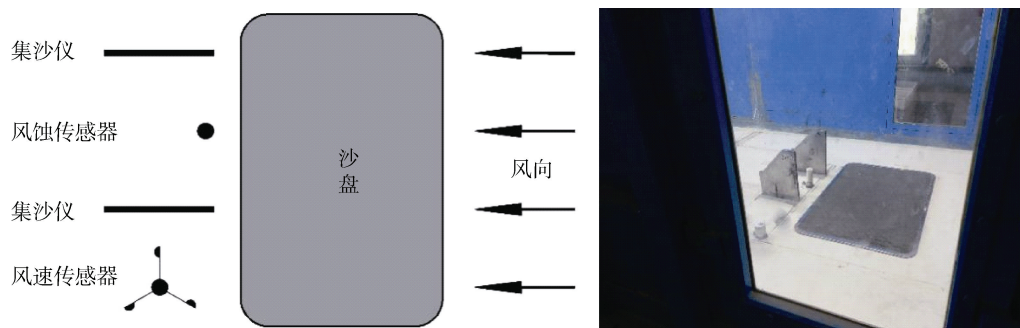


图 1 试验布设图

Fig. 1 Experimental layout

2 结果与分析

2.1 风速对尾矿风蚀率的影响

根据各组试验沙盘吹蚀前后质量差, 计算尾矿风蚀率, 并与吹蚀风速进行幂函数($y=ax^b$)、指数函数($y=ae^{bx}$)、二次多项式($y=ax^2+bx+c$)和对数函数($y=a-b\ln(x)$)拟合, 得到不同结皮量与含水率尾矿风蚀率与风速的关系(图 2)及最佳拟合函数结果(表 2)。结果显示, 风速对风蚀率的影响十分显著。风蚀率与风速的最佳拟合函数为二次多项式, 其在 0.01 显著性水平上的相关系数均在 0.98 以上。对照组风蚀率随风速增加由 4.03 g/(m²·min) 增加到 8 171.17 g/(m²·min),

增加 2 028.60 倍; 含水率 1.74% 组风蚀率随风速增加 201.29 倍, 结皮量 25 g 组增加 4 245.25 倍; 含水率 2.72% 组增加 52.49 倍, 结皮量 50 g 组增加 145.67 倍; 含水率 3.57% 组增加 10.33 倍, 结皮量 100 g 组增加 89.00 倍。无论何种处理, 风蚀率均随着风速的增加而增加, 但随着含水率和结皮量的增加, 风蚀率随风速的增长率在降低。目前, 部分学者^[2, 12-13]给出的草地、沙地、农田风蚀量随风速变化遵循幂函数分布, 而本研究与部分学者^[19, 22-23]给出的工业弃渣、煤矿土风蚀量随风速分布结果一致, 说明土壤差异对风蚀量随风速变化规律影响很大, 主要体现在土壤的理化性质、抗风蚀性和表层粗糙度等方面。

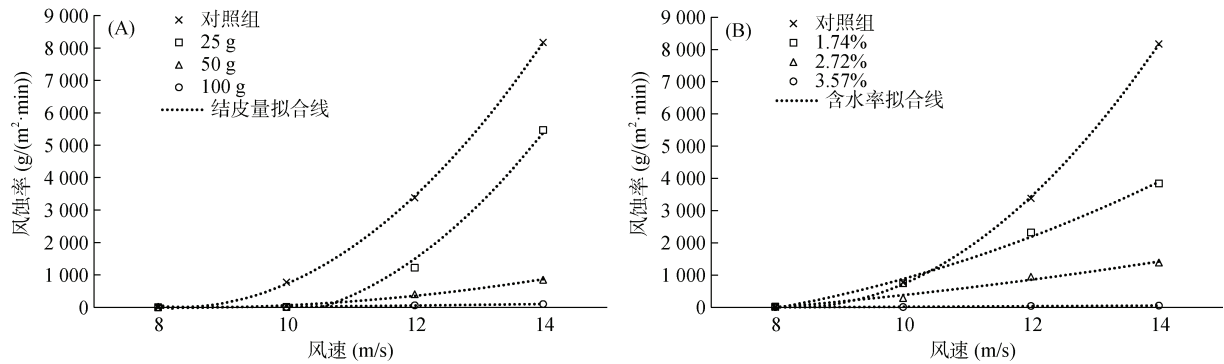


图 2 不同结皮量(A)与含水率(B)条件下风蚀率与风速关系

Fig. 2 Relationship between wind erosion rates and wind speeds under different crust quantities(A) and moistures(B)

表 2 不同结皮量与含水率条件下风蚀率与风速拟合结果
Table 2 Fitting results of wind erosion rates and wind speeds under different crust quantities and moistures

处理	最佳拟合关系式	R ²
结皮量 0 (对照)	$y = 1\,004.8x^2 - 2\,313.5x + 1\,330.6$	0.999 8
(g) 25	$y = 1\,060.6x^2 - 3\,541.1x + 2\,573.9$	0.991 6
50	$y = 109.65x^2 - 256.15x + 136.45$	0.989 5
100	$y = 6.171\,3x^2 + 3.875\,3x - 10.853$	0.988 1
含水率 0.3 (对照)	$y = 1\,004.8x^2 - 2\,313.5x + 1\,330.6$	0.999 8
(%) 1.74	$y = 197.92x^2 + 315.54x - 539.64$	0.995 3
2.72	$y = 44.24x^2 + 254.08x - 303.47$	0.983 5
3.57	$y = 1.541\,4x^2 + 10.486x - 9.524\,4$	0.938 8

2.2 结皮量与含水率对尾矿风蚀率的影响

通过对各试验组风蚀率与结皮量、含水率进行拟合,得到风蚀率与结皮量、含水率的关系(图 3),以及最佳拟合结果(表 3)。结果发现,结皮量和含水率变化对风蚀率的影响很大。风蚀率与结皮量、含水率的最佳拟合函数均为二次多项式,除 8 m/s 风速下结皮量的相关系数较低外,其余相关系数均在 0.93 以上。8 m/s 风速下各处理和对照的风蚀率均较低,不超过 30 g/(m²·min),含水率和结皮量增加对尾矿风蚀率的影响不明显。10 m/s 风速下含水率和结皮量增加对风蚀率的影响逐渐显现,随着含水率的提高,尾矿风蚀率降低了 765.58 g/(m²·min);随着结皮量的提高,尾矿风蚀率降低了 760.43 g/(m²·min)。12 m/s 风速下,

随着含水率和结皮量的提高,尾矿风蚀率分别降低了 3 336.98 和 3 317.65 g/(m²·min)。14 m/s 情况下,随着含水率和结皮量的提高,尾矿风蚀率分别降低了 8 116.41 和 8 069.71 g/(m²·min)。除 8 m/s 外,其他风速条件下风蚀率随结皮量和含水率的增加而降低,且风速越大,结皮量与含水率增加对风蚀率的影响越大。风蚀影响因子主要与风速、土壤抗蚀性和地表粗糙度等有关,结皮量和含水率对尾矿风蚀率产生的影响显然是由于结皮量增加了地表粗糙度,增强了表层抗蚀能力;含水率则增加了土壤颗粒粘结性,增强了土壤抗蚀性。

2.3 结皮量与含水率对尾矿风蚀颗粒分布的影响

本文利用梯度集沙仪收集各试验组样品吹蚀出的颗粒物,得到各结皮量和含水率条件下的风蚀颗粒随高度分布情况(图 4)及总风蚀颗粒量差异(图 5)。结果显示,总风蚀颗粒量随着风速的增大而增加,随着含水率和结皮量的增加而减小。各处理风蚀颗粒基本分布在 10 cm 内,部分处理在 3 cm 高度处达到最大,各处理 3 cm 以下颗粒物占总风蚀颗粒物的 50% 以上,最大能到 76.92%。风速 8 m/s 时,各处理颗粒分布随高度变化不明显,介于 0.011~0.039 g/min。随着风速的增大,颗粒分布结构逐渐出现差异。10 m/s 时,对照组,含水率 1.74% 和 2.72% 处理下的颗粒分布

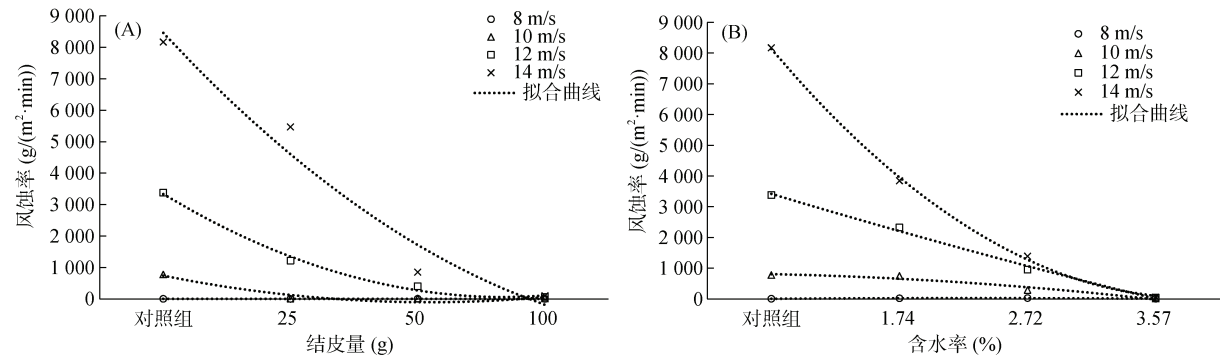


图 3 不同风速条件下风蚀率与结皮量(A)、含水率(B)关系

Fig. 3 Relationship between wind erosion rates with crust quantities (A) and moistures (B) under different wind speeds

表 3 不同风速条件下风蚀率与结皮量、含水率拟合结果
Table 3 Fitting results of wind erosion rates and crust quantities and moistures under different wind speeds

风速 (m/s)	处理	最佳拟合关系式	R ²
8	含水率	$y = -8.978x^2 + 45.808x - 33.778$	0.945 1
	结皮量	$y = -0.483 1x^2 + 1.996 9x + 1.690 9$	0.118 3
10	含水率	$y = -62.403x^2 + 36.476x + 832.66$	0.955 0
	结皮量	$y = 191.72x^2 - 1186.2x + 1 731.9$	0.931 0
12	含水率	$y = 37.269x^2 - 1 324.9x + 4 706.6$	0.995 3
	结皮量	$y = 455x^2 - 3 352x + 6 233.5$	0.994 4
14	含水率	$y = 748.03x^2 - 6 420.5x + 13 806$	0.999 3
	结皮量	$y = 487.95x^2 - 5 322.7x + 13 295$	0.962 1

随高度先增加后减小；12 m/s 时，对照组，含水率 1.74%、2.72%，以及结皮量 25 g 处理下的颗粒分布结构先增加后减小；14 m/s 时，对照组，含水率 1.74%、2.72%，以及结皮量 25 和 50 g 处理下的颗粒分布结构先增加后减小。随着风速的增大、含水率的降低，结皮量的减少，这种先增加后减小的分布结构越容易出现。出现这种现象的原因是当风速增大时，表层颗粒受到的剪切力增大，颗粒间碰撞能量增大，而含水率和结皮量保护不足，导致更多颗粒发生跃移，跃移高度增加，从而增大了风蚀颗粒物释放，改变了颗粒分布结构。

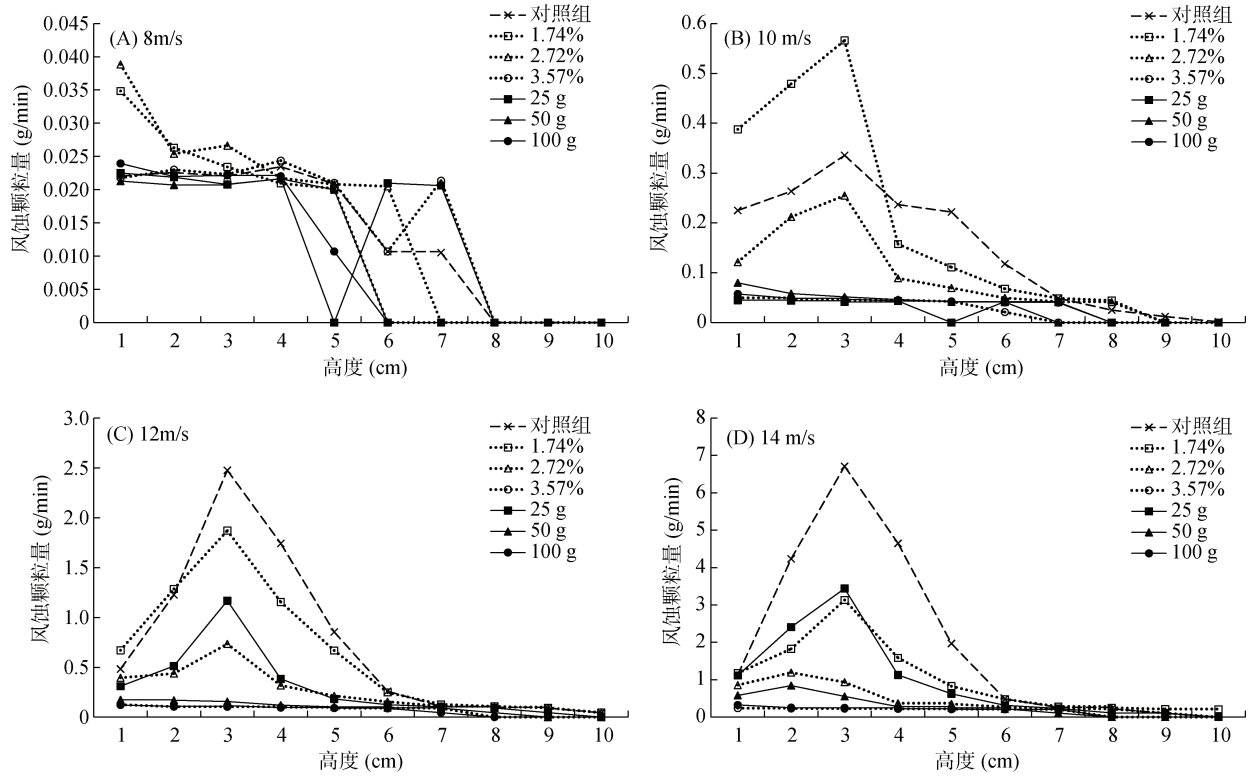


图 4 不同结皮量与含水率对风蚀颗粒分布的影响
Fig. 4 Influence of different crust quantities and moistures on aeolian-sand flow structure

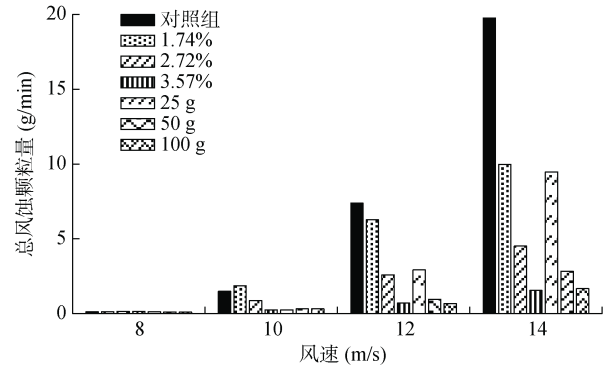


图 5 不同结皮量与含水率对总风蚀颗粒量的影响
Fig. 5 Influence of different crust quantities and moistures on total sediment discharge

2.4 结皮量与含水率对风蚀颗粒碰撞的影响

2.4.1 结皮量与含水率对颗粒碰撞数及能量的影响
各试验组在吹蚀时间内的颗粒碰撞总数及能量如图 6 所示，颗粒碰撞能量与数量同步变化。风速、含水率、结皮量变化均会对颗粒碰撞产生影响。风速越大，颗粒碰撞数及能量越大；除对照组外，含水率和结皮量越高，颗粒碰撞数及能量越小；与风速、含水率和结皮量对尾矿风蚀率、风蚀颗粒分布的规律一致。风速 8 m/s 试验组由于风速较小，结皮量 100 g 及含水率 3.57% 试验组由于抗风蚀能力较强，风蚀颗粒释放较少，颗粒碰撞数和能量也较小。

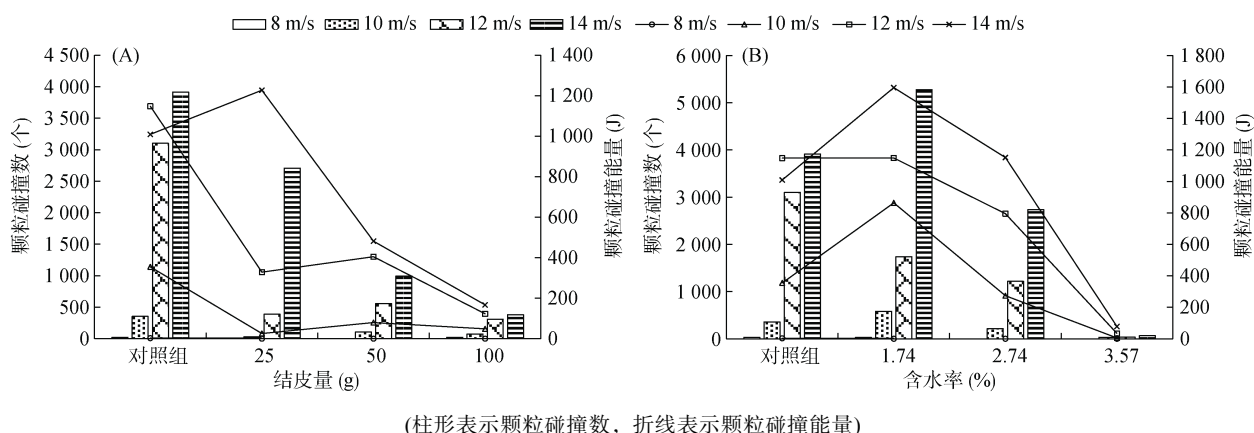


图 6 不同风速条件下颗粒碰撞与结皮量(A)、含水率(B)关系

Fig. 6 Relationship between particle collision with crust quantities(A) and moisture (B) under different wind speeds

2.4.2 颗粒碰撞数随时间的变化 由于 14 m/s 风速下风蚀效果最显著, 颗粒碰撞数及能量最大, 且颗粒碰撞数和能量同步变化, 因此本文选择 14 m/s 风速下不同含水率及结皮量吹蚀试验进行颗粒碰撞数随时间变化规律的分析, 结果如图 7 所示。不同处理下的尾矿颗粒释放随时间变化呈现相同的规律。除结皮量 25 g 处理外, 其他处理在风速增加段(约前 25 s), 颗粒碰撞数迅速增大到最大值, 当风速到达 14 m/s 并稳定后, 颗粒碰撞数随时间逐渐降低, 且随着含水率和结皮量的增加, 颗粒碰撞数峰值逐渐减小, 每秒颗粒碰撞数也逐渐减小。含水率 3.57% 的峰值颗粒碰撞数仅有 2 个, 总颗粒碰撞数仅有 65 个。在风速上升过程中, 不同处理首次出现颗粒碰撞的风速也有所差异, 对照组首次出现颗粒碰撞的风速为 8.45 m/s, 随着含水率和结皮量的增加, 首次出现颗粒碰撞的风速逐渐增大到 10.05 m/s, 说明随着含水率和结皮量的增加, 尾矿颗粒释放所需风速越大。

3 讨论

试验结果表明, 风速、含水率和结皮量对尾矿风蚀和颗粒释放均有较大影响。风速增加对风蚀和颗粒释放有促进作用, 含水率和结皮量增加对风蚀和颗粒释放有抑制作用, 二者耦合作用下, 含水率和结皮量增加能有效抵消风速增加对风蚀和颗粒释放的影响, 且风速越大效果越明显。但这仅仅从整体上说明了风速与含水率、结皮量对尾矿风蚀和颗粒释放的影响, 没有体现含水率和结皮量之间的差异。图 8 比较了含水率和结皮量在不同风速下的抗风蚀效率, 高含水率和结皮量(3.57% 和 100 g)在任何风速下防护效果均能达到 98% 以上, 差异不大; 中含水率和结皮量(2.72% 和 50 g)在任何风速下, 结皮的防护效果均比含水率好, 且呈现出随着风速的增大, 含水率防护效果增强,

结皮效果略微降低的趋势; 低含水率和结皮量(1.74% 和 25 g), 这种趋势更加明显, 低、中风速(10、12 m/s)结皮的防护效果比含水率好, 但高风速(14 m/s)含水率的防护效果比结皮好。造成同一结皮量防护效果随风速增大而降低这一现象是由于结皮量与风速耦合作用有临界值, 当结皮量小于或风速大于临界值, 结皮会被破坏, 一旦结皮被吹破, 破口处防护效力基本为零, 因此, 25 g 和 50 g 结皮量下, 防护效力随风速增大而减小, 25 g 结皮量能有效防护的临界风速为 12 m/s, 50 g 以上结皮量能有效防护的风速大于 14 m/s。同时, 造成相同含水率防护效果随风速增加而增加这种现象可能跟吹蚀时间有关, 10 m/s 吹蚀 15 min, 12 m/s 吹蚀 7 min, 14 m/s 吹蚀 3 min, 新疆夏季高温干燥, 样品暴露于空气时间越长, 水分散失越多, 抗风蚀效率越低, 且含水率越低对吹蚀时长越敏感, 当含水率增大后, 吹蚀时长造成的水分散失对抗风蚀效率的影响逐渐减弱。

综上, 在结皮量足够的情况下, 结皮的防护效果、适应性和稳定性比含水率高。一般来说, 为防止尾矿风蚀, 可采用物理法、植物法和化学法进行防护。物理法主要是采用物理方法覆盖尾矿表面, 比如覆盖砾石、树皮、稻草, 向尾矿喷水形成固化层等; 植物法主要是在尾矿上栽种永久性植物; 化学法主要是利用可与尾矿发生反应的化学试剂, 比如石灰、硅酸钠等, 在尾矿表面形成坚固硬壳^[24-26]。相比较而言, 植物法持续效果好、环境友好度高, 但植物筛选难、持续投入多、管护难; 化学法和物理法类似, 但化学法对环境污染大、成本高、化学试剂选择难; 物理法是较为适合西北干旱区的一种低成本防护方式, 且本文验证了物理结皮法的可行性及防护效果。对于本研究的尾矿, 200 mm 的全年降水量, 相当于在试验沙盘上喷洒了 42 g 的水, 能承受 14 m/s 的风吹蚀, 已可

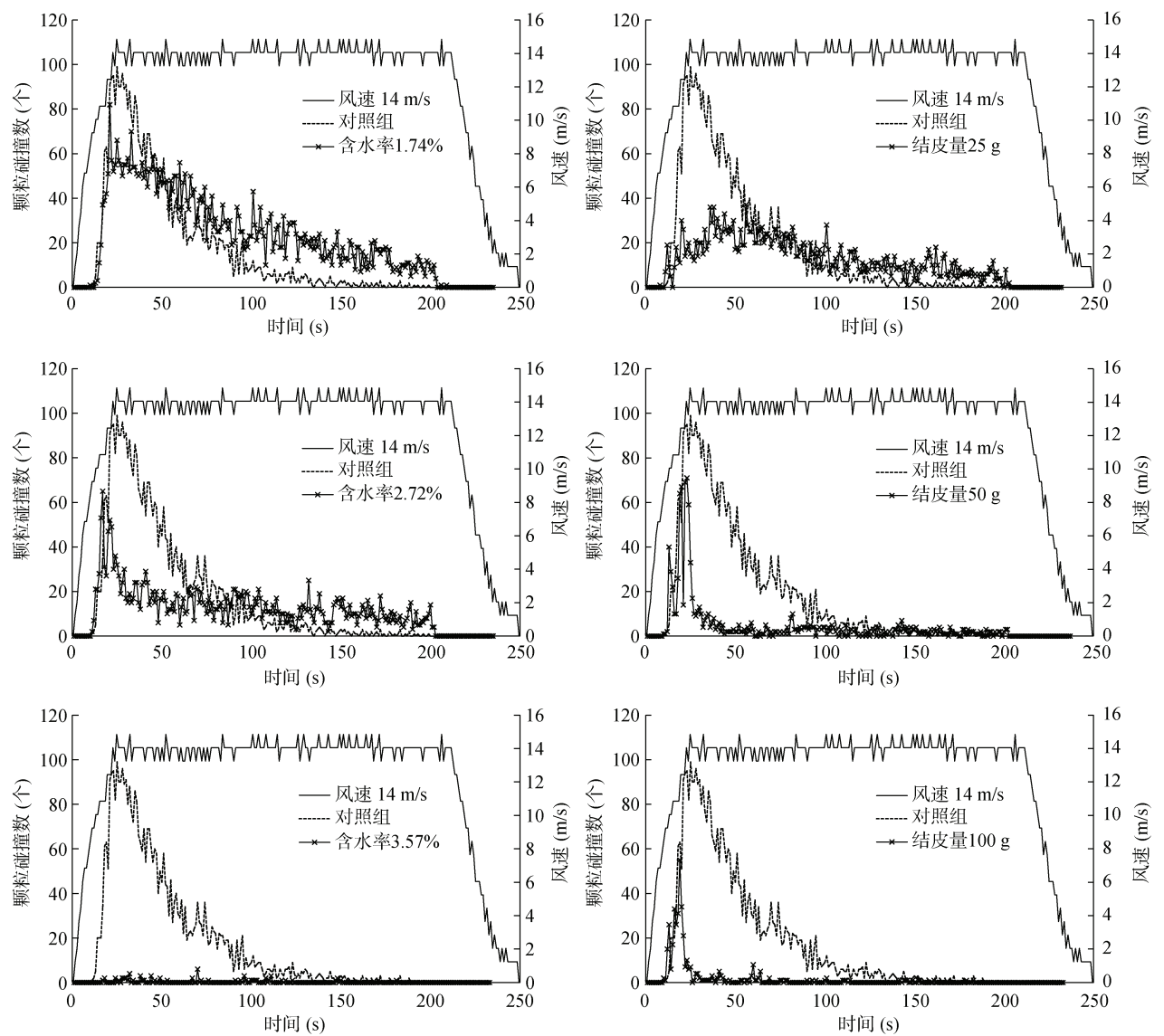


图 7 风速 14 m/s 下不同结皮量与含水率颗粒碰撞数随时间变化
Fig. 7 Frequencies of particle collisions of different crust quantities and moistures varies with time under 14 m/s

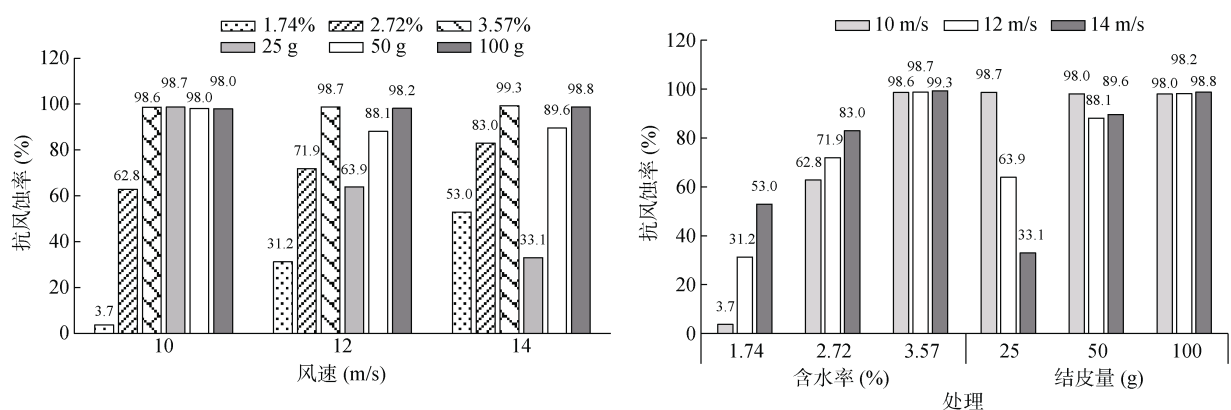


图 8 风速、结皮量与含水率对抗风蚀效果的影响
Fig. 8 Effects of wind speed, crust quantity and moisture on resistance to wind erosion

以发挥较好的防护效果，但这是多次降雨的总降水量，单次降水量以及两次降水之间结皮的老化问题未考虑，因此，结皮野外实际的防护效果还需更多试验加以研究。

4 结论

风速、含水率和结皮量对尾矿风蚀影响显著。风蚀率随风速的增加而增加,随结皮和含水率的增加而减小,均符合二次多项式函数拟合,二者耦合作用下,含水率和结皮量增加能有效抵消风速增加对风蚀的影响,且风速越大效果越明显。

风速、结皮量和含水率对尾矿风蚀颗粒释放也会产生一定影响。尾矿风蚀颗粒主要分布在 3 cm 以下,占总风蚀颗粒的 50% 以上。颗粒分布结构会随着风速的增加、含水率和结皮量的降低,逐渐出现先增加后减小的现象。总风蚀颗粒物、风蚀颗粒物碰撞数量和能量随着风速的增加而增加,随着含水率和结皮量的增加而减小。首次出现颗粒碰撞的风速随着含水率和结皮量的增加而增加。颗粒碰撞数随时间变化呈现一定的规律,在风速增加段,颗粒碰撞数迅速增大到最大值,当到达最大风速并稳定后,颗粒碰撞数随时间逐渐降低,且随着含水率和结皮量的增加,颗粒碰撞数峰值逐渐减小,每秒颗粒碰撞数也逐渐减小。

在结皮不被吹破的情况下,结皮的抗风蚀效果要优于含水率,因此,结皮抗风蚀效果与风速和结皮量有关,10 m/s 以下风速任何结皮量均能有效抗风蚀,12 m/s 需 25 g 以上结皮量,14 m/s 需要 50 g 以上结皮量。而含水率在任何试验风速下需达到 2.72% 以上才有较好的抗风蚀效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘铁军,赵显波,赵爱国,等.东北黑土地土壤风蚀风洞模拟试验研究[J].水土保持学报,2013,27(2):67-70.
- [3] 贺志霖,俎瑞平,屈建军,等.我国北方工业弃渣风蚀的风洞实验研究[J].水土保持学报,2014,28(4):29-32,65.
- [4] 陈银萍,曹雯婕,余沛东,等.土壤含水率对风沙流结构及风蚀量的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):173-180.
- [5] 申彦波,沈志宝,杜明远,等.风蚀起沙的影响因子及其变化特征[J].高原气象,2005,24(4):611-616.
- [6] 贺晶,吴新宏,杨婷婷,等.基于临界起沙风速的草地防风固沙功能研究[J].中国草地学报,2013,35(5):103-107.
- [7] 王一菲,郑粉莉,张加琼,等.冻融作用对典型黑土土壤风蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):34-41.
- [8] 孙宝洋,周蕊,王喆,等.黄河内蒙古段土壤风蚀特征模拟[J].中国沙漠,2020,40(4):120-127.
- [9] 刘珺,郭中领,常春平,等.基于 RWEQ 和 WEPS 模型的中国北方农牧交错带潜在风蚀模拟[J].中国沙漠,2021,41(2):27-37.
- [10] 李永强,李治国,董智,等.基于风洞模拟的荒漠草原不同放牧强度抗蚀特征比较[J].水土保持学报,2016,30(3):103-108.
- [11] 王志强,富宝锋,何艺峰,等.砾石覆盖对土壤风蚀防护效率的风洞模拟研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):90-93.
- [12] 杨彩红,王军强,柴强,等.民勤绿洲区撂荒农耕地抗风蚀效果[J].水土保持学报,2019,33(1):57-61,67.
- [13] 王仁德,肖登攀,常春平,等.农田风蚀量随风速的变化[J].中国沙漠,2015,35(5):1120-1127.
- [14] 周杰,李生字,王海峰,等.砂粒胶结体盖度与床面风沙活动关系的风洞模拟[J].干旱区研究,2016,33(4):892-897.
- [15] 程琴娟,蔡强国,马文军.我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J].地理研究,2008,27(6):1290-1298.
- [16] 周海林.尾矿库环境影响评价中应注意的问题[J].矿业工程,2013,11(5):65-68.
- [17] 张浩,王辉,汤红妍,等.铅锌尾矿库土壤和蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J].环境科学学报,2020,40(3):1085-1094.
- [18] 康婷.尾矿库采用不同排放方式的大气环境影响分析[J].环境与发展,2015,27(6):37-42.
- [19] 霍汉鑫,夏长亮,王新,等.风速和含水率对铅锌金属矿尾矿颗粒起尘的影响研究//中国环境科学学会.2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷)[C].中国环境科学学会:中国环境科学学会,2016:4.
- [20] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [21] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [22] 杨建军,汤东.露天煤矿区不同粒径土壤组分风蚀的风洞实验[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2021,38(2):213-219.
- [23] 毛旭芮,杨建军,曹月娥,等.土壤结皮面积与结皮分布对风蚀影响的风洞模拟研究[J].水土保持学报,2020,34(3):1-7.
- [24] 赖俊华,张凯,王维树,等.化学固沙材料研究进展及展望[J].中国沙漠,2017,37(4):644-658.
- [25] Almajed A, Lemboye K, Arab M G, et al. Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2): 356-371.
- [26] Nikseresht F, Landi A, Sayyad G, et al. Sugarcane molasse and vinasse added as microbial growth substrates increase calcium carbonate content, surface stability and resistance against wind erosion of desert soils[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110639.