

PAM 喷施量与施用方式对风沙土风蚀的影响

白岗栓^{1,2}, 罗东³, 苗庆丰⁴, 周楠², 杜社妮^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 陕西怡安建设工程有限公司, 西安 710021; 4. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010020)

摘要: 固定流沙和减少风蚀是一个世界性的难题。PAM(聚丙烯酰胺, polyacrylamide)作为一种线性高分子聚合物, 喷洒在土壤表层能形成结皮, 能有效抵御风蚀, 但喷施 PAM 溶液的结皮状况及抗风蚀能力与 PAM 的喷施量及土壤特性等密切相关, 且 PAM 溶液的浓度越大则黏性越强, 越不易喷洒。为了探寻 PAM 防风固沙的适宜喷施量及简便施用方法, 该研究以乌兰布和沙漠流动沙丘的风沙土为试验材料, 以风沙土的风干土及饱和湿土为对照, 首先探讨 PAM 不同喷施量对风干土(风沙土)表层结皮状况、土壤含水率及土壤风蚀量的影响, 以寻求 PAM 的适宜喷施量, 然后再将适量的 PAM 干撒、干撒后喷水和喷施于风干土表层, 探寻 PAM 的简便施用方法。结果表明: 1) PAM 不同喷施量的结皮覆盖度、结皮厚度、结皮抗剪强度均随 PAM 喷施量的增加而增加, 均显著高于风干土和饱和湿土; PAM 不同喷施量的土壤含水率均高于风干土, 且随着时间的延续均显著高于饱和湿土; 喷施 1、2、3 和 4 g/m² 的 PAM 风蚀量分别为风干土的 26.83%、14.10%、13.01%和 13.00%, 为饱和湿土的 28.78%、15.12%、14.02%和 13.94%, 当 PAM 喷施量达到 2 g/m² 时, PAM 能有效降低风沙土的风蚀量。2) 将 2 g/m² 的 PAM 干撒、干撒后喷水和喷施于风干土表层, 干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液的土壤结皮覆盖度、结皮厚度、结皮抗剪强度均高于风干土、饱和湿土和干撒 PAM, 干撒 PAM 的土壤表层结皮覆盖度低于饱和湿土但高于风干土, 结皮厚度和结皮抗剪强度高于风干土及饱和湿土, 干撒 PAM 后喷水及喷施 PAM 溶液的土壤含水率高于风干土、饱和湿土及干撒 PAM, 干撒 PAM 的土壤含水率与风干土基本一致。干撒 PAM、干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液的风蚀量分别为风干土的 53.13%、11.17%和 6.35%, 为饱和湿土的 76.34%、16.05%和 9.12%, 干撒 PAM 后喷水的抗风蚀能力接近于风沙土表层喷施 PAM 溶液。3) 由于喷施 PAM 溶液需消耗大量的水分及人力, 建议风沙区可在降雨前将 2 g/m² 的 PAM 干撒于土壤表层或干撒后向土壤喷水, 可有效减少风蚀量。

关键词: 土壤; 水分; PAM; 施用量; 施用方法; 结皮; 风蚀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.011

中图分类号: S157.2; X43

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-10-0090-09

白岗栓, 罗东, 苗庆丰, 等. PAM 喷施量与施用方式对风沙土风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 90-98. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.011 <http://www.tcsae.org>

Bai Gangshuan, Luo Dong, Miao Qingfeng, et al. Effects of spraying amounts and application methods of polyacrylamide (PAM) on aeolian sandy soil wind erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 90-98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.011 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤风蚀是指在一定的风力作用下土壤或土壤母质、土壤颗粒发生位移造成土壤结构破坏、土壤物质损失的过程, 同时也是气流或气固两相流对土壤表层的吹蚀和磨蚀过程^[1]。中国沙化土地面积已达 $1.74 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 18.2%, 风蚀是中国北方地区土壤退化的主要因素, 是干旱、半干旱区荒漠化的主要过程^[2]。控制风蚀的主要的措施一是覆盖(包括植被覆盖、秸秆覆盖及黏土、石块覆盖等)土壤表层, 阻断风力与土壤表层的直接接触; 二是改善土壤特性, 增强土壤颗粒间的粘滞力, 提高土壤的抗风蚀能力。植被覆盖可有效减少风蚀, 但在风沙严重和极端干旱、寒冷的环境条件下却难以发挥作用。PAM(聚丙烯酰胺, polyacrylamide)作为一种线性水溶性高分子聚合物, 主链上含有大量的酰胺

基, 具有很强的粘滞作用和水合作用, 能够吸附、包裹、粘结土壤颗粒, 改善土壤颗粒结构, 增加土壤团聚体, 降低土壤水蚀和风蚀^[3-8], 且对土壤无毒害作用^[9-10], 但 PAM 降低土壤水蚀和风蚀的能力主要与 PAM 的施用量、施用方法、土壤质地、土壤水分及 PAM 分子量的大小、PAM 的类型等密切相关^[11-17]。陈渠昌等^[18-20]的研究表明, 小剂量的 PAM 可增加土壤团聚体, 提高土壤孔隙度, 改善土壤结构, 抑制土壤表层结皮, 促进土壤水分入渗, 减少地表径流, 减少土壤水蚀量; 大剂量的 PAM 喷施于土壤表层则可促进土壤表层结皮, 提高土壤结皮厚度及抗剪强度, 增加地表径流, 减少土壤水蚀量及土壤风蚀量。PAM 喷洒于土壤表层, 能够在土壤表层形成相对稳定、紧密的土壤结皮, 能够有效减少土壤水蚀和风蚀^[21-22], 尤其是当结皮变得干燥时, 其抗剪强度及抵御风蚀的能力更加增强^[23-25]。沙尘暴与土地沙漠化直接威胁着人们的生存环境, 固定流沙和减少风蚀是一个世界性的难题^[1-2]。目前有关 PAM 减少风蚀的试验多为风洞试验^[11-2, 18-19, 25-26], 野外应用 PAM 防风固沙的报道较少, 且制取 PAM 溶液需消耗大量的人力物力, 不利于野外大面积推广应用^[17]。为

收稿日期: 2020-01-03 修订日期: 2020-04-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501602)

作者简介: 白岗栓, 研究员, 主要从事农田生态及果树栽培方面的研究。

Email: gshb@nwsuaf.edu.cn

了寻求 PAM 防沙治沙的适宜施用量及简便方法, 本试验在乌兰布和沙漠东缘, 以流动沙丘的风沙土为材料, 开展了 PAM 不同喷施量及施用方式对风沙土风蚀的影响研究。

1 材料与方法

1.1 试验区的自然状况

乌兰布和沙漠是中国八大沙漠之一, 地处内蒙古自治区西部, $106^{\circ}09'-106^{\circ}57'E$, $39^{\circ}16'-40^{\circ}57'N$, 面积 $9\,082\text{ km}^2$, 其中沙丘面积为 $8\,640\text{ km}^2$ 。沙丘中的流动沙丘为 $4\,536\text{ km}^2$, 半固定沙丘为 $1\,978\text{ km}^2$, 固定沙丘为 $2\,126\text{ km}^2$ ^[27], 流动沙丘的坡度多为 $18^{\circ}\sim 22^{\circ}$; 年均风速 $3.0\sim 3.7\text{ m/s}$, 其中 3—5 月为 4.8 m/s , 最大瞬时风速为 24 m/s , 以西风及西南风为主, 其中春夏季以西风为主; 年均沙尘暴日数 10.9 d , 大风日数 12.5 d , 扬沙日数 30.2 d , 主要集中于 3—5 月。乌兰布和沙漠夏季炎热干燥, 冬春季干旱少雨, 年降水量为 140.3 mm , 其中 6—9 月降水量为全年降水量的 78.8% , 年蒸发量为 $2\,380.6\text{ mm}$, 相对湿度为 47% , 最大冻土层为 58 cm , 无霜期 146 d , 日照时数 $3\,181\text{ h}$ 。以旱生、超旱生类型的荒漠植被和盐生植被为主, 如白刺 (*Nitraria tangutorum*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*) 等。土壤主要有灰漠土、盐土、灌淤土、风沙土、淡棕钙土等。试验地位于乌兰布和沙漠东缘的磴口县坝楞村, $107^{\circ}02'11"E$, $40^{\circ}24'52"N$, 海拔 $1\,049.6\text{ m}$ 。

1.2 试验材料

供试 PAM 为阴离子型, 白色粉末状, 分子量为 $12.0\times 10^6\text{ g/mol}$ (即 1200 万 Da, Da 表示一个 ^{12}C 原子质量的 $1/12$), 水解度为 20.0% , 能够吸附 63 倍的 1% 氯化钠溶液或 1 300 倍的纯水, 残余单体小于 0.5% , 具有很强的水合作用和絮凝作用, 由胜利油田长安集团提供。

供试土壤取自于乌兰布和沙漠东缘的流动沙丘, 为风沙土, 容重 1.57 g/cm^3 , 颗粒直径 <0.075 、 $0.075\sim 0.25$ 、 $>0.25\text{ mm}$ 分别占 2.65% 、 97.1% 和 0.25% , 风干后质量含水率为 0.55% , 质量饱和含水率为 5.65% 。

1.3 试验设计

试验于 2017 年 3—6 月及 2018 年 3—6 月在乌兰布和沙漠东缘的磴口县坝楞村进行。

1.3.1 PAM 喷施量

2017 年 3—6 月, 试验以风干的风沙土 (简称风干土, 质量水分含量 0.55%) 及水分饱和的风沙土 (简称饱和湿土, 质量水分含量为 5.65%) 为对照, 分别向风干土表层喷施 1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 g/m^2 的 PAM 溶液, 并使风干土水分达到饱和, 探讨 PAM 不同喷施量对乌兰布和沙漠风沙土风蚀的影响, 以筛选 PAM 防风固沙的适宜施用量。

2017 年试验为 6 个处理, 每个处理均重复 6 次, 共 36 个样箱 (不包含相当于保护行的样箱), 其中每个处理的 3 个样箱用于测定土壤表层的结皮覆盖度和风蚀量, 3 个样箱用于测定土壤表层的结皮厚度、抗剪强度和土壤含水率。

2017 年 3 月 10 日, 在乌兰布和沙漠空旷处, 试验前将 15.70 kg 自然风干的风沙土装入宽 20 cm , 高 10 cm , 长

50 cm 的钢板样箱中 (每个样箱重 4.0 kg), 所有样箱面向正西方向, 间隔 60 cm , 随机排列成一条直线, 以消除上风向样箱对下风方向样箱风速、风向的影响。为了避免地面流沙及测量过程中样箱变形和振动等对试验结果的影响, 将样箱以当地流动沙丘的自然坡度 20° (36.40%) 固定于距地面 100 cm 的试验钢架上, 然后按试验设计喷水及喷施 PAM 溶液。为了避免边际效应 (主要是北风和南风) 对试验结果造成影响, 在测试样箱的两端, 各摆放同一高度、同一角度和同一间隔距离的相当于保护行的空样箱 3 个, 以减少非主流风向对试验结果的影响。

试验前分别将 0.1 , 0.2 , 0.3 , 0.4 g 各 6 份的 PAM 溶入 24 份 800.7 g 的纯净水中, 待 PAM 完全溶解后分别喷施于对应的 24 个样箱中, 相当于向风干土喷施 1.0 , 2.0 , 3.0 , 4.0 g/m^2 (样箱土壤表层面积为 0.1 m^2) 的 PAM 溶液并使风干土的水分含量达到饱和 (质量含水率达到 5.65% , 喷洒水量 = (饱和湿土土壤水分 - 风干土土壤水分) $\times$ 样箱风干土质量), 简称 PAM1.0、PAM2.0、PAM3.0 和 PAM4.0。同时向相应的 6 个风干土样箱各喷洒 800.7 g 的纯净水, 促使土壤含水率达到饱和, 作为对照中的饱和湿土, 剩余 6 个样箱作为对照中的风干土。

1.3.2 PAM 施用方式

根据 2017 年的试验结果及相关文献^[1,3-4,18-19,25-26,28], 2018 年 3—6 月, 以风干土和饱和湿土为对照, 将 2 g/m^2 的 PAM 分别干撒于风干土表层 (简称干撒 PAM)、PAM 干撒于风干土表层后喷水至风干土水分达到饱和 (简称干撒 PAM 后喷水) 及喷施 PAM 溶液至风干土水分达到饱和 (简称喷施 PAM 溶液), 探讨 PAM 施用方法对风沙土风蚀的影响, 以寻求 PAM 防风固沙的简便施用方法。

2018 年试验共 5 个处理, 6 次重复, 共 30 个样箱 (不包含相当于保护行的样箱), 其中每个处理的 3 个样箱用于测定土壤表层的结皮覆盖度和风蚀量, 3 个样箱用于测定土壤表层的结皮厚度、抗剪强度和土壤含水率。

2018 年各处理的样箱大小、间隔距离、固定高度及角度、样箱中的土壤量及保护行样箱等均与 2017 年相同。

2018 年 3 月 14 日在干撒 PAM 的 6 个样箱和干撒 PAM 后喷水处理的 6 个样箱表层采取 200 g 土样, 与 0.2 g PAM 混合均匀 (样箱土壤表层面积为 0.1 m^2 , PAM 施用量为 2 g/m^2), 然后均匀撒施于风干土表层。对于饱和湿土的 6 个样箱及干撒 PAM 后喷水的 6 个样箱, 待 PAM 干撒完后, 每个样箱土壤表层均匀喷洒 800.7 g 纯净水, 促使样箱中的土壤水分达到饱和。对于喷施 PAM 溶液处理的 6 个样箱, 每个样箱用 800.7 g 纯净水溶解 0.2 g PAM, 不断晃动以达到充分溶解, 溶解后均匀喷洒到样箱中的土壤表层, 并促使样箱中的土壤水分达到饱和, 剩余 6 个样箱作为对照中的风干土。

1.3.3 试验过程注意事项

2017 年及 2018 年, 试验布设中为了避免撒施 PAM、喷施 PAM 溶液和喷水时风力对撒施、喷施均匀度的影响, 干撒 PAM、喷施 PAM 溶液和喷水时样箱上罩一大纸箱, 纸箱口背对主风向, 干撒 PAM、喷施 PAM 溶液和喷水

完毕后移走大纸箱。所有样箱在填满风干土、干撒 PAM、喷施 PAM 溶液及喷水后土壤表层及时用塑料薄膜严密覆盖, 确保样箱土壤水分不会散失并促使土壤表层结皮形成, 第 2 天上午 10 时左右轻轻去除塑料薄膜, 确保去除塑料薄膜时不粘带土粒及破坏样箱土壤表层的结皮。测试期间样箱土壤中萌发的杂草均及时贴土壤表层剪除, 以防影响试验结果。

1.4 测试项目

1) 降水量及风速

在样箱旁空旷处设置 HOBO 小型自动气象站 (H21-001 数据采集器), 监测试验期间的降水量及距地面 2.0 m 处的日均风速和每日最大瞬时风速。

2) 结皮覆盖度和风蚀量

从 2017 年的 3 月 15 日至 6 月 12 日、2018 年 3 月 15 日至 6 月 12 日, 每隔 15 d (当天 10:00 时左右) 在每个处理测定结皮覆盖度和风蚀量的样箱中, 测定不同处理的结皮覆盖度 (土壤结皮覆盖度指土壤表层形成的结皮面积占土壤表层面积的百分比, 不包含土壤表层的裂隙、小风蚀坑等, %) 和风蚀量。结皮覆盖度用样方法即方格法测定 (在 1 块 20 cm×50 cm 玻璃面上按 1 cm×1 cm 划成网格, 然后放在样箱上测定土壤表层结皮格子的比例)^[29]。从 2017 年 3 月 25 日至 6 月 8 日 (含 3 月 25 日)、2018 年 3 月 29 日至 6 月 12 日 (含 2018 年 3 月 29 日), 每隔 15 d 用称重法测定不同处理的风蚀量。为避免风力对称质量的影响, 将天平放置于大纸箱内, 纸箱口背对主风向, 轻取轻放对样箱进行称质量。根据每次称质量前后 2 次土壤的减少量及土壤中的质量水分含量, 将减少的土壤量折合为风干土质

量, 作为不同测定期不同处理的土壤风蚀量, 并根据测定面积及土壤容重, 折合成单位面积的风蚀量 (g/m^2) 及风蚀深度。

3) 结皮厚度、结皮抗剪强度及土壤含水率

从 2017 年的 3 月 15 日至 6 月 12 日、2018 年 3 月 15 日至 6 月 12 日, 每隔 15 d 在每个处理测定结皮厚度、结皮抗剪强度及土壤含水率的样箱中, 用电子游标卡尺测定土壤表层结皮厚度 (土壤表层结皮厚度指较为干燥时施加外力能够使土壤表层的结皮层完整自然剥离的厚度, mm), 用袖珍剪力仪 (BWT2XZJL) 测定结皮抗剪强度 (kPa)^[29], 用烘干法测定样箱表层至底层的土壤质量含水率 (%) (取样后及时用含水率相近的风沙土填补取样孔隙, 以减少风力掏蚀对表层结皮的影响)。

1.5 数据处理

测试数据采用 Excel 2010 制作图表, 采用 SPSS19.0 软件进行单因素方差分析; 采用 Duncan's 多重比较进行检验。测试时仅 2 个处理有试验数据, 则用 student test 检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 试验期间的降水量及风速

2017 年监测期间共降水 42.6 mm, 其中 3 月 14 日至 3 月 23 日降水日数高达 6 d, 降水量达 15.1 mm。3 月 24 日至 5 月 13 日连续 58 d 无降水过程, 5 月 14 日降水 1.8 mm, 6 月 4 日和 6 月 5 日分别降水 12.3 和 13.4 mm。监测期间日均风速平均为 3.83 m/s, 每日最大风速平均为 6.33 m/s, 等于或超过起沙风速 5.0 m/s^[25]的天数分别为 41 和 49 d, 最大瞬时风速为 15.4 m/s (图 1a)。

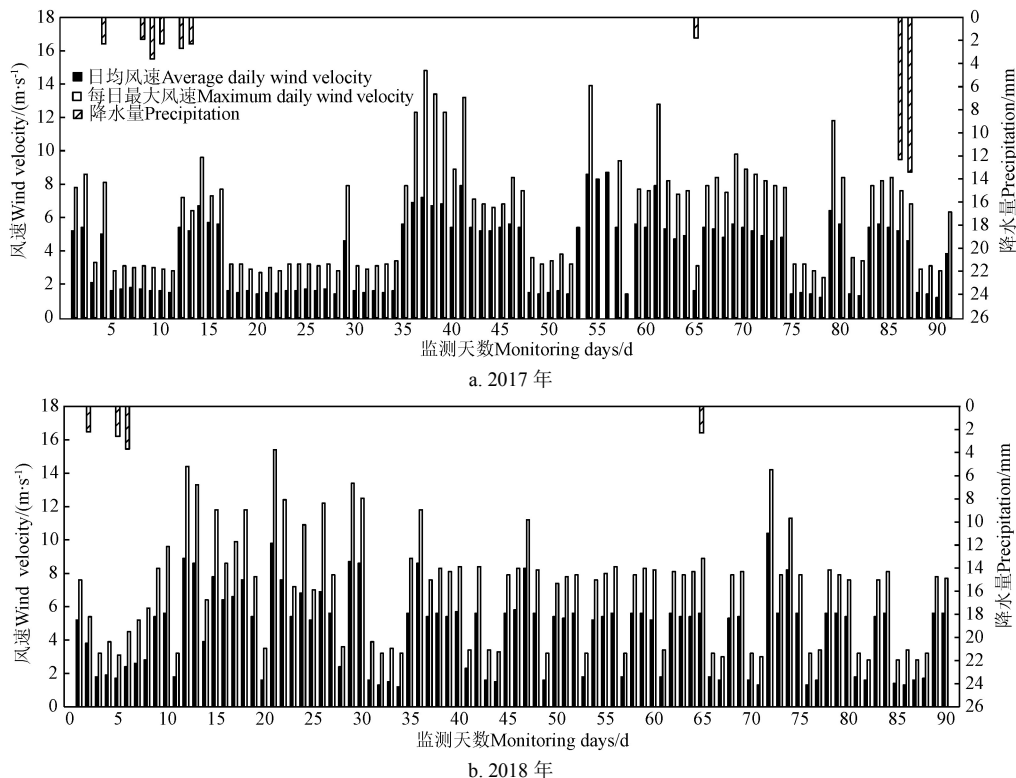


图1 2017-2018年试验监测期间的风速与降水量

Fig.1 Wind velocity and precipitation during 2017-2018 monitoring period

2018 年监测期间 3 月 16 日、3 月 19 日、3 月 20 日及 5 月 18 日分别降水 2.2、2.6、3.7 和 2.3 mm, 共计降水 10.8 mm。3 月 21 日至 5 月 17 日连续 58 d 无降水。监测期间日均风速平均为 4.59 m/s, 每日最大风速平均为 7.09 m/s, 超过起沙风速的天数分别为 44 d 和 48 d, 最大瞬时风速为 15.4 m/s (图 1b)。

2.2 PAM 喷施量对土壤风蚀的影响

2.2.1 PAM 喷施量对土壤结皮覆盖度、结皮厚度和结皮抗剪强度的影响

风干土在试验初期未形成结皮, 风干土和饱和湿土

在长时段缺乏降水的情况下如 5 月 9 日和 5 月 24 日无结皮残存, 而 PAM 不同喷施量的结皮覆盖度则随喷施量的升高而升高, 受自然降水的影响程度相对较低。当降水稀少或无降水, 起沙风速天数多时, 不同处理的结皮覆盖度降低或无结皮残存; 当有降水或降水较多, 起沙风速天数少时, 不同处理的结皮覆盖度升高。监测期间风干土的平均结皮覆盖度极显著低于饱和湿土 ($P<0.01$), 饱和湿土的极显著低于 PAM 不同喷施量 ($P<0.01$); PAM 不同喷施量的结皮覆盖度随着喷施量的降低而降低, 不同喷施量之间无显著差异 (表 1)。

表 1 PAM 不同喷施量条件下土壤结皮覆盖度、结皮厚度和抗剪强度

Table 1 Crust coverage, crust thickness and shear strength of soil under condition of different spraying amounts of PAM

项目 Item	处理 Treatments	测定日期 Determination date							平均 Average
		03-11	03-25	04-09	04-24	05-09	05-24	06-08	
结皮覆盖度 Crust coverage/%	风干土	-	98.87aA	97.98aA	14.35cC	-	-	98.68aA	44.43cC
	饱和湿土	100.00aA	99.46aA	98.46aA	23.16bB	-	-	99.06aA	60.10bB
	PAM1.0	100.00aA	100.00aA	100.00aA	89.86aA	81.56bA	76.42bA	100.00aA	92.55aA
	PAM2.0	100.00aA	100.00aA	100.00aA	91.42aA	86.47aA	81.56aA	100.00aA	94.21aA
	PAM3.0	100.00aA	100.00aA	100.00aA	93.4aA	88.68aA	82.54aA	100.00aA	94.95aA
	PAM4.0	100.00aA	100.00aA	100.00aA	94.53aA	90.24aA	84.68aA	100.00aA	95.64aA
结皮厚度 Crust thickness/mm	风干土	-	1.27dC	0.96dC	0.74cC	-	-	1.12dC	0.58eD
	饱和湿土	1.31dC	1.33dC	1.01dC	0.81dC	-	-	1.13dC	0.80dC
	PAM1.0	3.42cB	3.47cB	3.36cB	3.26cB	2.98cB	2.52cB	2.69cB	3.10cB
	PAM2.0	3.72bAB	3.76bAB	3.68bAB	3.53bAB	3.21bAB	2.96bAB	3.12bAB	3.43bAB
	PAM3.0	3.86abA	3.92abA	3.86abA	3.71abA	3.46abA	3.16abA	3.37abA	3.62aA
	PAM4.0	3.98aA	4.02aA	3.98aA	3.85aA	3.54aA	3.22aA	3.42aA	3.72aA
结皮抗剪强度 Crust shear strength/kPa	风干土	-	4.5dC	3.9dC	3.4dC	-	-	4.1dC	2.27eD
	饱和湿土	4.3dC	4.7dC	4.1dC	3.6dC	-	-	4.1dC	2.97dC
	PAM1.0	18.6cB	19.4cB	19.8cB	20.1cB	20.2cB	20.3cB	20.4cB	19.83cB
	PAM2.0	22.8bA	23.2bA	23.6bA	23.7bA	23.9bA	24.1bA	24.3bA	23.66bA
	PAM3.0	24.6aA	25.4aA	25.6aA	25.7aA	26.0aA	26.2aA	26.3aA	25.69aA
	PAM4.0	25.4aA	25.7aA	25.8aA	25.9aA	26.2aA	26.4aA	26.5aA	25.997aA

注: PAM1.0、PAM2.0、PAM3.0、PAM4.0 分别表示 PAM 喷施量为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 g·m⁻²。“-”表示未形成结皮, 计算平均值时其值为 0。同列不同小写字母表示不同处理之间存在显著差异 ($P<0.05$), 不同大写字母表示不同处理之间存在极显著差异 ($P<0.01$)。下同。

Note: PAM1.0, PAM2.0, PAM3.0, PAM4.0 indicate that spraying amounts of PAM are 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 g·m⁻², respectively. The “-” indicates that the crust is not formed, when calculating the average value, its value is 0. Different lowercase letter within the same column indicate significant difference ($P<0.05$) between different treatments, while different uppercase letters indicate extremely significant difference ($P<0.01$) between different treatments. The same as below.

风干土及饱和湿土的结皮厚度主要受降水的影响, 降水量偏多则结皮较厚, 降水偏少则较薄或无结皮存在。PAM 不同喷施量的结皮厚度主要随喷施量的增高而增厚, 随时间的延续则变薄, 遇雨则略微增厚。监测期间风干土的平均结皮厚度极显著低于饱和湿土 ($P<0.01$), 饱和湿土的极显著低于 PAM1.0 ($P<0.01$), PAM1.0 的显著 ($P<0.05$) 低于 PAM2.0, PAM2.0 的显著 ($P<0.05$) 低于 PAM3.0 和 PAM4.0 (表 1)。

风干土和饱和湿土的结皮抗剪强度主要随降水的发生而改变, PAM 不同喷施量的结皮抗剪强度主要受喷施量的影响, 且随时间延续缓慢上升。监测期间风干土的平均结皮抗剪强度极显著 ($P<0.01$) 低于饱和湿土, 饱和湿土的极显著低于 PAM1.0 ($P<0.01$), PAM1.0 的极显著 ($P<0.01$) 低于 PAM2.0, PAM2.0 的显著 ($P<0.05$) 低于 PAM3.0 和 PAM4.0 (表 1)。

2.2.2 PAM 喷施量对土壤含水率和土壤风蚀的影响

风干土和饱和湿土的土壤含水率主要受降水影响, PAM 不同喷施量的土壤水分除受降水影响外, 也受 PAM

喷施量的影响。监测期间风干土的平均土壤含水率极显著低于饱和湿土 ($P<0.01$), 饱和湿土的极显著 ($P<0.01$) 低于 PAM1.0, PAM1.0 的显著 ($P<0.05$) 低于 PAM2.0, PAM2.0 与 PAM3.0、PAM4.0 之间无显著差异 (表 2)。

风干土和饱和湿土的风蚀量主要受起沙风速、起沙风速天数及降水的影响, 表现为起沙风速越大, 起沙风速天数越多, 风蚀量则越大; 降水天数越多, 降雨量越大, 风蚀量则越小。PAM 不同喷施量的土壤风蚀量除受起沙风速、起沙风速天数和降水影响外, 也与 PAM 的喷施量密切相关。监测期间风干土、饱和湿土、PAM1.0、PAM2.0、PAM3.0 和 PAM4.0 的风蚀量合计分别为 24 743、23 065、6 639、3 488、3 234 和 3 216 g/m², 折合风蚀深度为 15.76、14.69、4.23、2.22、2.06 和 2.05 mm。PAM1.0、PAM2.0、PAM3.0 和 PAM4.0 的风蚀量分别为风干土的 26.83%、14.10%、13.01%和 13.00%, 为饱和湿土的 28.78%、15.12%、14.02%和 13.94%; 饱和湿土为风干土的 93.22%。PAM 不同喷施量均具有良好的固沙作用, 综合考虑当 PAM 的喷施量达到 2.0 g/m² 以上时效果更佳 (表 3)。

表 2 PAM 不同喷施量条件下土壤含水量
Table 2 Soil moisture under condition of different spraying amounts of PAM

处理 Treatments	测定日期 Determination date							平均 Average
	03-11	03-25	04-09	04-24	05-09	05-24	06-08	
风干土 Air-dried soil	0.55bB	5.61aA	2.56cB	1.32cB	1.04cC	0.98cC	5.15bA	2.46dC
饱和湿土 Saturated soil	5.65aA	5.63aA	2.58cB	1.34cB	1.06cC	0.99cC	5.21bA	3.21cB
PAM1.0	5.65aA	5.64aA	4.47bA	3.57bA	3.06bbB	2.54bB	5.52aA	4.34bA
PAM2.0	5.65aA	5.64aA	4.83aA	3.87aA	3.53aA	2.98aA	5.57aA	4.58aA
PAM3.0	5.65aA	5.64aA	4.86aA	3.94aA	3.64aA	3.04aA	5.59aA	4.62aA
PAM4.0	5.65aA	5.63aA	4.87aA	3.96aA	3.71aA	3.08aA	5.61aA	4.64aA

表 3 PAM 不同喷施量条件下土壤风蚀量
Table 3 Soil wind erosion under condition of different spraying amounts of PAM

处理 Treatments	测定日期 Determination date						合计 Total
	03-25	04-09	04-24	05-09	05-24	06-08	
风干土 Air-dried soil	329aA	468aA	5 867aA	6 578aA	7 264aA	4 237aA	24 743aA
饱和湿土 Saturated soil	178bB	269bB	4 674bB	6 498aA	7 217aA	4 229aA	23 065bA
PAM1.0	54cC	72cC	1 027cC	1 897bB	2 021bB	1 568bB	6 639cB
PAM2.0	41dD	61dD	568dD	956cC	1 021cC	841cC	3 488dC
PAM3.0	39deD	58deD	549dD	943cC	987cC	658dD	3 234dC
PAM4.0	38eD	57eD	541dD	942cC	984cC	654dD	3 216dC

2.3 PAM 施用方式对土壤风蚀的影响

2.3.1 PAM 施用方式对土壤结皮覆盖度、结皮厚度和结皮抗剪强度的影响

2018 年监测期间的降水量较 2017 年小,受降水、风蚀和施用方法的影响,监测期间风干土有 5 次无结皮残存,饱和湿土和干撒 PAM 有 4 次无结皮残存,而干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液则一直有结皮存在,且随着时间的延续,干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液的结皮覆盖度差异逐渐增大,由初始的无显著差异逐渐演变为

显著差异 ($P<0.05$), 最终达到极显著 ($P<0.01$)。监测期间风干土的平均结皮覆盖度极显著 ($P<0.01$) 低于饱和湿土,与 2017 年的结果一致;干撒 PAM 的平均结皮覆盖度极显著 ($P<0.01$) 高于风干土但却极显著 ($P<0.01$) 低于饱和湿土,说明在干旱环境下受风蚀的影响,干撒 PAM 难以形成良好的土壤结皮;干撒 PAM 后喷水的结皮覆盖度极显著 ($P<0.01$) 高于 PAM 饱和湿土却显著 ($P<0.05$) 低于喷施 PAM 溶液,说明干撒 PAM 后喷水可促进土壤表层形成结皮,但却逊于喷施 PAM 溶液(表 4)。

表 4 PAM 不同施用方式条件下土壤结皮覆盖度、结皮厚度和抗剪强度
Table 4 Crust coverage, crust thickness and shear strength of soil under condition of different application methods of PAM

项目 Item	处理 Treatments	测定日期 Determination date							平均 Average
		03-15	03-29	04-13	04-28	05-13	05-28	06-12	
结皮覆盖度 Crust coverage/%	风干土	-	18.5dD	-	-	-	9.8cC	-	4.04eD
	饱和湿土	100aA	51.5bB	-	-	-	10.2cC	-	23.10cB
	干撒 PAM	-	36.6cC	12.6cB	-	-	9.8cC	-	8.43dC
	干撒 PAM 后喷水	100aA	98.6aA	94.3bA	89.4bA	83.4bB	81.5bB	79.6bB	89.54bA
	喷施 PAM 溶液	100aA	99.8aA	98.6aA	96.4aA	94.3aA	94.2aA	93.1aA	96.63aA
结皮厚度 Crust thickness/mm	风干土	-	1.1dC	-	-	-	1.1cC	-	0.37eE
	饱和湿土	1.2cC	1.2dC	-	-	-	1.2cC	-	0.60dD
	干撒	-	2.6cB	2.4cB	-	-	1.1cC	-	1.02cC
	干撒 PAM 后喷水	2.9bB	3.0bB	2.8bB	2.6bB	2.5bB	2.6bB	2.5bB	2.73bB
	喷施 PAM 溶液	3.7aA	3.8aA	3.6aA	3.5aA	3.4aA	3.5aA	3.4aA	3.58aA
结皮抗剪强度 Crust shear strength/kPa	风干土	-	4.3dD	-	-	-	4.1cC	-	1.20eE
	饱和湿土	4.2cC	4.6dD	-	-	-	4.2cC	-	1.86dD
	干撒 PAM	-	12.8cC	11.9cC	-	-	4.2cC	-	4.13cC
	干撒 PAM 后喷水	17.8bB	19.4bB	19.6bB	20.2bB	20.3bB	20.4bB	20.4bB	19.73bB
	喷施 PAM 溶液	22.6aA	24.8aA	25.3aA	25.6aA	25.7aA	25.7aA	25.7aA	25.06aA

2018 年监测期间风干土、饱和湿土和干撒 PAM 形成结皮的机会少且结皮厚度薄,干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液始终均有结皮存在且较厚,但随时间延续则缓慢变薄。监测期间风干土的平均结皮厚度极显著 ($P<0.01$)

低于饱和湿土,与 2017 年的结果相同;饱和湿土的极显著低于干撒 PAM ($P<0.01$),干撒 PAM 的则极显著低于干撒 PAM 后喷水 ($P<0.01$),干撒 PAM 后喷水的极显著 ($P<0.01$) 低于喷施 PAM 溶液(表 4)。

当风干土和饱和湿土同时有结皮残存时，二者的结皮抗剪强度基本一致。前期干撒 PAM 的结皮抗剪强度极显著 ($P<0.01$) 高于风干土和饱和湿土，后期则与风干土和饱和湿土基本相同，说明后期干撒 PAM 表层基本无 PAM 残存。干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液的结皮抗剪强度随时间的延续缓慢上升。监测期间风干土的平均结皮抗剪强度极显著 ($P<0.01$) 低于饱和湿土，饱和湿土的极显著 ($P<0.01$) 低于干撒 PAM，干撒 PAM 的极显著 ($P<0.01$) 低于干撒 PAM 后喷水，干撒 PAM 后喷水的极显著

($P<0.01$) 低于喷施 PAM 溶液 (表 4)。
2.3.2 PAM 不同施用方式对土壤水分和土壤风蚀的影响
风干土、饱和湿土和干撒 PAM 的土壤水分除饱和湿土前期受施用方式影响外，三者的土壤水分主要随降水量的多少而发生变化，干撒 PAM 后喷水及喷施 PAM 溶液的除受降水影响外，也受施用方式的影响。监测期间风干土的平均土壤含水率与干撒 PAM 的基本相同，2 者均极显著 ($P<0.01$) 低于饱和湿土，饱和湿土的极显著 ($P<0.01$) 低于干撒 PAM 后喷水，干撒 PAM 后喷水的极显著 ($P<0.01$) 低于喷施 PAM 溶液 (表 5)。

表 5 PAM 不同施用方式下土壤含水率
Table 5 Soil moisture under condition of different application methods of PAM

处理 Treatments	测定日期 Determination date							平均 Average
	03-15	03-29	04-13	04-28	05-13	05-28	06-12	
风干土 Air-dried soil	0.55bB	1.38dC	1.14bB	0.97cC	0.87cC	1.18cC	0.74cC	0.98dD
饱和湿土 Saturated soil	5.65aA	2.42bB	1.16bB	0.98cC	0.88cC	1.19cC	0.75cC	1.86cC
干撒 PAM Dry sprinkled PAM	0.55bB	1.46cC	1.18bB	1.01cC	0.88cC	1.19cC	0.75cC	1.00dD
干撒 PAM 后喷水 Dry sprinkled PAM+spraying water	5.65aA	4.56aA	3.54aA	2.46bB	2.24bB	2.06bB	1.97bB	3.21bB
喷施 PAM 溶液 Spraying PAM solution	5.65aA	4.78aA	3.67aA	3.34aA	3.08aA	2.98aA	2.68aA	3.74aA

风干土、干撒 PAM 和饱和湿土的风蚀量主要受起沙风速及降水的影响。干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 的除受起沙风速和降水影响外，也与 PAM 的施用方法密切相关。监测期间风干土、饱和湿土、干撒 PAM、干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液的风蚀量合计分别为 42 249、29 403、22 445、4 720 及 2 681 g/m²，折合风蚀深度为

26.91、18.73、14.30、3.01 和 1.71 mm。干撒 PAM、干撒 PAM 后喷水和喷施 PAM 溶液的风蚀量分别为风干土的 53.13%、11.17%和 6.35%，为饱和湿土的 76.34%、16.05%和 9.12%；饱和湿土的风蚀量为风干土的 69.59%。干撒 PAM 后喷水及喷施 PAM 溶液均有良好的减少风蚀作用 (表 6)。

表 6 PAM 不同施用方式下土壤风蚀量
Table 6 Wind erosion under condition of different application methods of PAM

处理 Treatments	测定日期 Determination date						合计 Total
	03-29	04-13	04-28	05-13	05-28	06-12	
风干土 Air-dried soil	8 167aA	15 389aA	7 539aA	5 028aA	3 297aA	2 829aA	42 249aA
饱和湿土 Saturated soil	3 764cB	10 367bB	5 338bB	4 296bB	2 826bB	2 812aA	29 403bB
干撒 PAM Dry sprinkled PAM	4 072bB	5 339cC	3 769cC	3 798cC	2 669cB	2 798aA	22 445cC
干撒 PAM 喷水 Dry sprinkled PAM+spraying water	324dC	623dD	954dD	1 091dD	943dC	785bB	4 720dD
喷施 PAM 溶液 Spraying PAM solution	156eD	468eE	472eE	628eE	471eD	486cC	2 681eE

3 讨 论

沙尘暴与土地沙漠化直接威胁着人们的生存环境，固定流沙和减少风蚀是一个世界性的难题^[1-2]。PAM 作为一种线性高分子聚合物，具有很强的水合作用和粘滞作用^[30-31]。PAM 溶液喷施在土壤表层能够防风固沙，首先是 PAM 遇水溶解后形成的链状结构，能够吸附、包裹、粘结大量松散的可蚀性土壤颗粒，在松散的土壤表层形成结皮，增加土壤表层的整体性，隔绝土壤颗粒与风力接触，避免土壤颗粒遭受风力侵蚀，从而减少了风蚀量；第二是 PAM 具有强烈的吸附、包裹、粘结作用，能将细小的土壤颗粒吸附、包裹、粘结成新的或更大的土壤团聚体，从而提高了土壤颗粒的起动风速^[1-2,18-19]；第三是

PAM 的长链可深入到土壤颗粒之间，减少土壤颗粒之间的直接接触，减少土壤颗粒之间的能量传递，减少土壤颗粒的振动，提高了土壤颗粒的稳定性，从而减少了土壤颗粒的风蚀量^[18-19]。此外，PAM 在土壤表层形成结皮，可有效减少土壤颗粒的水分蒸发，促进土壤颗粒保持较高的含水率，提高土壤颗粒表面水膜的静电引力，提高土壤颗粒间的黏着力，从而提高了土壤颗粒的抗风蚀能力^[21-22, 25, 32]。风干土及饱和湿土表层形成的土壤结皮是物理性结皮，是降雨或喷洒的水分打击夯实土壤表层颗粒导致土壤团聚体发生物理变化而形成的结构性结皮，其结皮覆盖度、结皮厚度、结皮抗剪强度及水分含量不但受自然降水的影响，而且结皮较薄，抗剪强度低，易遭受风力的破坏，因而风蚀量较大。受试验方法的影响，

饱和湿土在试验初始阶段水分含量高且形成结皮, 因而试验初始阶段抗风蚀能力高于风干土, 随后受水分蒸散及风力侵蚀的影响, 抗风蚀能力逐渐与风干土保持一致。PAM 的喷施量越大, 形成的结皮覆盖度越高, 越厚, 抗剪强度越大, 整体性越强, 越不易遭受风力破坏, 因而固沙能力越强, 抗风蚀能力越强; 且结皮的整体性越强, 土壤中的水分越不易散失, 越利于提高土壤的起沙风速, 降低风蚀量。PAM1.0 形成的结皮相对较薄, 抗剪强度相对较低, 在遭遇风力的不断吹蚀及风沙流的不断磨蚀时易遭到破坏, 易为风力掏蚀提供机会, 因而抗风蚀能力较弱。PAM2.0 的结皮厚度及结皮抗剪强度较 PAM3.0 和 PAM4.0 较低, 但其风蚀量与 PAM3.0 和 PAM4.0 基本一致, 说明 PAM2.0 已具有良好的抗风蚀能力。PAM 不同喷施量的结皮抗剪强度随时间的延长而缓慢增加, 这主要是结皮中的水分含量降低, 促使结皮形成更为紧密的结构^[21-23]。

PAM 干撒于土壤表层, 由于缺少水分难以溶解, 不能在土壤表层形成结皮, 只有在降水后才能形成。试验初期有少量降水, 但干撒的 PAM 大多已被风吹蚀掉, 故在试验初期测定时有少量结皮, 风蚀量低于风干土, 说明 PAM 干撒后遇到降水可降低风蚀量; 干撒 PAM 在试验初期形成的结皮不够完整, 随着风力的不断吹蚀及掏蚀被逐渐蚕食掉, 因而在试验中后期其抗风蚀能力消耗殆尽。干撒 PAM 后喷水与喷施 PAM 溶液在试验初期土壤表层能够形成完整的结皮, 且结皮覆盖度高, 结皮较厚且抗剪强度大, 土壤含水率高, 因而其抗风蚀的能力强; 随着风力的不断吹蚀及风沙流对表层土壤及结皮的不断磨蚀及掏蚀, 结皮厚度逐渐变薄(遇雨后则变厚), 土壤含水率逐渐降低且部分结皮遭到破坏, 土壤颗粒从破坏处不断逸出并逐渐被镂空而产生风蚀, 因而干撒 PAM 后喷水与喷施 PAM 溶液的风蚀量逐渐增大, 抗风蚀能力逐渐降低。干撒 PAM 后喷水的结皮较喷施 PAM 溶液的薄且不均匀, 易受到风力的破坏及掏蚀, 故其风蚀量高于喷施 PAM 溶液。喷施 PAM 溶液形成的结皮均匀、光滑且较厚, 能够有效保护结皮下的土壤颗粒不受风力吹蚀及风沙流的磨蚀, 因而其抗风蚀的能力较强。

乌兰布和沙漠流沙区水资源缺乏, 地广人稀, 溶解 PAM 需要消耗大量的水分及人力, 且 PAM 溶液非常黏稠, 不便喷施^[17], 将 2.0 g/m² 的 PAM 干粉撒施于土壤表层后喷水或根据天气预报在降水前将 2.0 g/m² 的 PAM 干粉撒施于流动沙丘或土壤表层, 能够在流动沙丘或土壤表层形成结皮, 可有效降低风蚀量, 可取得与 PAM 溶液喷施于流动沙丘或土壤表层的同等效果。

4 结 论

1) 风沙土表层喷施不同量的 PAM 溶液, 均可提高土壤表层的结皮覆盖度、结皮厚度、结皮抗剪强度和土壤含水率, 降低土壤风蚀量; 当 PAM 喷施量达到 2.0 g/m² 时, 喷施 PAM 溶液可有效降低风蚀量。

2) 当 PAM 施用量为 2.0 g/m² 时, 将 PAM 干撒于风沙土表层和 PAM 干撒后及时喷水, 也可有效提高土壤表

层的结皮覆盖度、结皮厚度、结皮抗剪强度和土壤含水率, 降低土壤风蚀量, 其中干撒 PAM 后喷水的抗风蚀能力接近风沙土表层喷施 PAM 溶液。

3) 喷施 PAM 溶液需消耗大量的水分及人力, 建议乌兰布和风沙区在降雨前将 2.0 g/m² 的 PAM 干粉撒施于流动沙丘或土壤表层或撒施后及时向流动沙丘或土壤表层喷水, 可有效减少风蚀量。

[参 考 文 献]

- [1] 和继军, 蔡强国, 唐泽军. PAM 控制土壤风蚀的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 12-15.
He Jijun, Cai Qiangguo, Tang Zejun. Wind tunnel experimental study on soil wind erosion control with PAM[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(20): 12-15. (in Chinese with English abstract)
- [2] 黄河, 施斌, 刘瑾, 等. STW 型生态土壤稳定剂用于防风固沙试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1900-1904.
Huang He, Shi Bin, Liu Jin, et al. Experimental study on application of STW ecotypic soil stabilizer in windbreak and sand fixation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1900-1904. (in Chinese with English abstract)
- [3] Sirjacobs D, Shainberg I, Rapp I, et al. Polyacrylamide, sediments, and interrupted flow effects on rill erosion and intake rate[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(4): 1487-1495.
- [4] Nadler A, Perfect E, Kay B D. Effect of polyacrylamide application on the stability of dry and wet aggregates[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(2): 555-561.
- [5] Ben-Hur M, Faris J, Malik M, et al. Polymers as soil conditioners under consecutive irrigations and rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(4): 1173-1177.
- [6] Ben-Hur M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(2): 565-570.
- [7] Lentz R D, Sojka R E, Carter D L, et al. Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6): 1926-1932.
- [8] Ajwa H A, Trout T J. Polyacrylamide and water quality effects on infiltration in sandy loam soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 643-650.
- [9] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management[J]. Advances in Agronomy, 2007, 92(1): 75-162.
- [10] Kristian A J, Bjornberg D L, Sojka R E. Sprinkler irrigation runoff and erosion control with polyacrylamide-laboratory tests[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1681-1687.
- [11] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with Polyacrylamide and surfactants: applications for irrigated agriculture[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(5): 290-300.
- [12] Shainberg I, Warrington D, Rengasamy P. Water quality and PAM interactions in reducing surface sealing[J]. Soil Science, 1990, 149(5): 301-307.
- [13] Yu Jian, Lei T, Shainberg I, et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Science

- Society of America Journal, 2003, 67(2): 630-636.
- [14] Green V S, Stott D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1786-1791.
- [15] Giménez D, Dirksen C, Miedema R, et al. Surface sealing and hydraulic conductances under varying-intensity rains[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(1): 234-242.
- [16] Barvenik F W. Polyacrylamide characteristics related to soil applications[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 235-243.
- [17] 于健, 雷廷武, Shainberg I, 等. 不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 38-44.
- Yu Jian, Lei Tingwu, Shainberg I, et al. Effects of different application methods of polyacrylamide (PAM) on soil infiltration and erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(7): 38-44. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈渠昌, 雷廷武, 唐泽军. 施用 PAM 防治松散土风蚀的机理及其抵御风沙流能力研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 1-6.
- Chen Quchang, Lei Tingwu, Tang Zejun. Study on mechanism by use of PAM to keep from wind erosion of loosening soil and its capability to withstand wind flow with sand[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈渠昌, 江培福, 雷廷武, 等. 利用 PAM 防治松散扰动沙土风蚀效果的风洞试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 7-11.
- Chen Quchang, Jiang Peifu, Lei Tingwu, et al. Wind tunnel experiment on the impacts of polyacrylamide on wind erosion of loosen soil materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(10): 7-11. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈渠昌, 雷廷武, 李瑞平. PAM 对坡地降雨径流入渗和水力侵蚀的影响研究[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1290-1296.
- Chen Quchang, Lei Tingwu, Li Ruiping. The impacts of PAM on runoff/infiltration and water erosion from slope lands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1290-1296. (in Chinese with English abstract)
- [21] Levy G J, Levin J, Gal M, et al. Polymers effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 902-907.
- [22] Ben-Hur M. Runoff, erosion, and polymer application in moving-sprinkler irrigation[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 283-290.
- [23] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration[J]. Soil Science, 1994, 158(4): 274-282.
- [24] Cook D F, Nelson S D. Effect of polyacrylamide on seedling emergence in crust-forming soils[J]. Soil Science, 1986, 141(5): 328-333.
- [25] 刘东, 任树梅, 杨培岭. PAM 对土壤抗风蚀能力的影响[J]. 中国水土保持, 2006(12): 33-35.
- Liu Dong, Ren Shumei, Yang Peiling. Influence of PAM to capability of anti-wind erosion of soil[J]. Soil and Water Conservation in China, 2006(12): 33-35. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李元元, 王占礼. 聚丙烯酰胺 (PAM) 防治土壤风蚀的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 1002-1008
- Li Yuan Yuan, Wang Zhanli. Research progress on wind erosion control with polyacrylamide (PAM)[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 1002-1008. (in Chinese with English abstract)
- [27] 高君亮, 郝玉光, 丁国栋, 等. 乌兰布和荒漠生态系统防风固沙功能价值初步评估[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 41-46.
- Gao Junliang, Hao Yuguang, Ding Guodong, et al. Primary assessment on the wind-breaking and sand-fixing function of the vegetation and its value in Ulan Buh desert ecosystem[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王小彬, 蔡典雄. 土壤调理剂 PAM 的农用研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 457-463.
- Wang Xiaobin, Cai Dianxiong. Research and application of soil conditioner in agriculture[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 457-463. (in Chinese with English abstract)
- [29] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 35-40.
- Xiao Bo, Zhao Yunge, Shao Ming'an. Effects of biological soil crust on saturated hydraulic conductivity in water-wind erosion crisscross region, north of Shaanxi Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(12): 35-40. (in Chinese with English abstract)
- [30] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 降雨及聚丙烯酰胺 (PAM) 作用下土壤的封闭过程和结皮的形成[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 674-681.
- Tang Zejun, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Sealing process and crust formation at soil surface under the impacts of raindrops and polyacrylamide[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 674-681. (in Chinese with English abstract)
- [31] 韩冬, 魏占民, 于健, 等. 干粉 PAM 溶解时间对土壤饱和导水率的动态影响[J]. 土壤, 2016, 48(2): 368-373.
- Han Dong, Wei Zhanmin, Yu Jian, et al. Dynamic effect of the dissolution time of PAM on soil saturated hydraulic conductivity[J]. Soils, 2016, 48(2): 368-373. (in Chinese with English abstract)
- [32] 李晓丽, 申向东. 结皮土壤的抗风蚀性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 203-207.
- Li Xiaoli, Shen Xiangdong. The analysis on the mechanism of anti-wind erosion of soil crust[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(2): 203-207. (in Chinese with English abstract)

Effects of spraying amounts and application methods of polyacrylamide (PAM) on aeolian sandy soil wind erosion

Bai Gangshuan^{1,2}, Luo Dong³, Miao Qingfeng⁴, Zhou Nan², Du Shen^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Shaanxi Yi'an Construction Engineering Co.LTD, Xi'an 710021, China; 4. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010020, China)

Abstract: Sandstorm and desertification have posed a worldwide threat to fix quicksand and reduce soil wind erosion for people's living environment. PAM (polyacrylamide), a kind of linear polymer, has been widely used in metallurgy, building materials, paper, mineral processing, oil production, sewage treatment and other industries due to its strong hydration and viscosity, and thereby it is also expected to resist the wind erosion. There is no any toxic effect on soil when spraying PAM solution on the soil surface. The main reason is that the sprayed PAM solution can form hard crust on the soil surface, and then the crust can effectively protect soil from wind erosion. However, the crust condition and wind erosion resistance of PAM are closely related to the PAM application methods, spraying amount and structure of soil. Moreover, high concentration of PAM solution can be a high viscosity, difficult to dissolve or spray, and lead to inconvenient spray on the surface of sand dune or soil. Taking the aeolian sandy soil as test material, this study aims to explore the optimal spraying amount and application method of PAM to prevent wind and fix sand, while reduce water consumption, by tailoring the properties of air-dried soil (aeolian sandy soil) and saturated soil. Specifically, the effects PAM of spraying amounts on surface crust, moisture and soil wind erosion of air-dried soil were investigated to determine the optimal spraying amount of PAM, and then, an optimal amount of PAM was used in the following ways: dry PAM sprinkled, dry PAM sprinkled+spraying water, and spraying PAM solution, to explore a facile method for the application of PAM. The results showed that the soil shear strength, the coverage and thickness of soil crust after PAM treatment increased with the increase of PAM spraying amounts, all of which were significantly higher than that of air-dried soil and saturated soil. The soil moisture after PAM treatment was significantly higher than that of air-dried soil and saturated soil over time. When spraying PAM of 1, 2, 3, and 4 g/m², the wind erosion were 26.83%, 14.10%, 13.01% and 13.00% of air-dried soil, whereas, 28.78%, 15.12%, 14.02% and 13.94% of saturated soil, respectively. When the spraying amount of PAM reached 2 g/m², PAM can effectively reduce the wind erosion of aeolian sandy soil. After 2 g/m² dry PAM sprinkled+spraying water and spraying, the coverage and thickness of soil crust, and soil shear strength were higher than that of air-dried soil, saturated soil and dry PAM sprinkled. In dry PAM sprinkled treatment, the coverage of soil crust was lower than that of saturated soil, but higher than that of air-dried soil, whereas, the thickness of soil crust and soil shear strength were higher than that of air-dried soil and saturated soil. In dry PAM sprinkled+spraying and spraying PAM solution, the soil moisture was higher than that of air-dried soil, saturated soil and dry PAM sprinkled. In dry PAM sprinkled, the soil moisture was basically the same as that of air-dried soil. The soil wind erosion after dry PAM sprinkled, dry PAM sprinkled+spraying water and spraying PAM solution were 53.13%, 11.17% and 6.35%, of air-dried soil, respectively, and 76.34%, 16.05% and 9.12%, of saturated soil, respectively. In the dry PAM sprinkled+spraying water, the resistance of wind erosion was close to that in the spraying PAM solution on the surface of aeolian sandy soil. In order to save water and manpower when preparing and spraying the PAM solution, two measurements were proposed. One is that 2 g/m² PAM powder can be dry sprinkled on the surface of sand dunes and soil before rain in the wind-sand areas according to weather forecast. Another is, after dry PAM powder sprinkling, the sprayed water on the surface of sand dunes and soil can effectively fix the quicksand and reduce the amount of soil wind erosion.

Keywords: soils; moisture; PAM; spraying amount; application method; crust; wind erosion