# 库布齐沙漠北缘机械沙障对地表土壤可蚀性的影响

靳灵娜[1]，党晓宏[1,2]，高 永[1]，韩彦隆[1]，雷虹娟[3]，张 超[1]

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2.内蒙古杭锦荒漠生态定位观测研究站，内蒙古 鄂尔多斯 017400；3.内蒙古达茂旗民安镇综合保障和技术推广中心，内蒙古 包头 014300)

**摘　要：**[目的] 明确机械沙障铺设对风沙区地表可蚀性特征的影响，为防沙工程中沙障的合理应用提供理论依据。[方法] 采取库布齐沙漠北缘迎风坡不同年限铺设的生物基可降解聚乳酸(PLA)沙袋沙障、沙柳沙障和芦苇沙障不同坡位的土壤样品，分析了地表 0—20 cm 深度土壤有机质含量、土壤粒径组成和土壤可蚀性 $K$ 值。[结果] ①沙障铺设后利于土壤有机质含量增加，其中 2 m×2 m 沙柳沙障对土壤有机质的积累效果最好，且迎风坡上部土壤有机质含量相对较少。②沙障铺设使得障格内黏粒、粉粒和细砂含量增加，随设障年限的增加其呈增加趋势；土壤 0—20 cm 范围内均以细砂为主。③铺设机械沙障可降低土壤可蚀性，各立地条件下沙丘下部障格内土壤抗蚀性最好；3 种机械沙障中沙柳沙障抗蚀性较高；随设障年限增加障格内土壤抗蚀性增强，设障 4 a 后，2 m×2 m 铺设规格障格内的土壤受侵蚀风险较小；土壤可蚀性 $K$ 值与土壤有机质含量呈极显著($p<0.01$)负相关。[结论] 沙障铺设使土壤有机质含量增加，利于细粒物质的积累，增强土壤抗蚀性，是治理流动沙丘有效的风蚀防治措施。建议在库布齐沙漠北缘铺设机械沙障时，可采用迎风坡上部铺设 1 m×1 m 的生物基可降解聚乳酸(PLA)沙袋沙障，中部铺设 2 m×2 m 的沙柳沙障，下部铺设 2 m×2 m 的生物基可降解聚乳酸(PLA)沙袋沙障的模式。

**关键词：**土壤可蚀性 $K$ 值；沙柳沙障；PLA 沙障；芦苇沙障；库布齐沙漠

**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-288X(2021)03-0050-06　　**中图分类号：**S288

**文献参数：**靳灵娜，党晓宏，高永，等.库布齐沙漠北缘机械沙障对地表土壤可蚀性的影响[J].水土保持通报，2021，41(3)：50-55.DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.007；Jin Lingna，Dang Xiaohong，Gao Yong，et al. Effects of mechanical sand barriers on soil erodibility on northern edge of Kubuqi Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2021，41(3)：50-55.

# Effects of Mechanical Sand Barriers on Soil Erodibility on Northern Edge of Kubuqi Desert

Jin Lingna[1]，Dang Xiaohong[1,2]，Gao Yong[1]，Han Yanlong[1]，Lei Hongjuan[3]，Zhang Chao[1]

(1.*College of Desert Control*，*Inner Mongolia Agricultural University*，*Hohhot*，*Inner Mongolia* 010018，*China*；2.*Hangjin Desert Ecological Positioning Observation and Research Station*，*Ordos*，*Inner Mongolia* 017400，*China*；3.*Comprehensive Security and Technology Promotion Center of Min'an Town*，*Damao Banner*，*Inner Mongolia*，*Baotou*，*Inner Mongolia* 014300，*China*)

**Abstract：**[Objective] The effects of mechanical sand barriers on surface erodibility in sandy areas which experience windy conditions were clarified in order to provide a theoretical basis for the application of a sand barrier in sand prevention engineering. [Methods] Soil samples taken from biodegradable polylactide (PLA) sandbag barriers，*Salix psammophila* sand barriers and reed sand barriers laid in different years on the windword slope of the northern margin of Kubuqi Desert were used to analyze soil organic matter content，soil particle size composition and soil erodibility $K$ value at the 0—20 cm depth. [Results] ① The laying of sand barriers increased soil organic matter content. The 2 m×2 m *S. psammophila* sand barrier had the best effect on the accumulation of soil organic matter，and the soil organic matter content on the windward slope

**收稿日期：**2020-11-25　　**修回日期：**2021-01-25

**资助项目：**国家重点研发专项“不同气候区固沙新材料研发、筛选与施配技术及效果研究”(2018YFC0507101)；内蒙古自治区科技重大专项课题“浑善达克沙地沙地植被快速营建技术研究”；内蒙古自治区研究生科研创新项“不同年限麦草方格沙障近地表风蚀沙埋特征及其风沙动力学过程研究”

**第一作者：**靳灵娜(1995—)，女(汉族)，内蒙古自治区呼和浩特市人，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治。Email：1461001391@qq.com。

**通讯作者：**高永(1962—)，男(汉族)，内蒙古自治区包头市人，教授，博士生导师，主要从事荒漠化防治研究。Email：13948815709@163.com。

was relatively small. ② Laying of sand barriers increased the content of clay, silt, and fine sand in the barriers, and those contents increased with increased laying time. The soil in 0—20 cm layer was dominated by fine sand. ③ Laying of mechanical sand barriers could reduce soil erodibility, and the soil in the lower barriers of the dunes had the best erosion resistance under various site conditions. Among the three types of mechanical sand barriers, the *S. psammophila* sand barriers had the highest erosion resistance. Barrier effectiveness increased with laying time, and soil erosion resistance also increased. Four years after installation of sand barriers, the risk of soil erosion within the 2 m×2 m laying specification was relatively small. The soil erodibility *K* value and the soil organic matter content were negatively ($p<0.01$) correlated. [Conclusion] The laying of sand barriers increases the content of soil organic matter, and is conducive to the accumulation of fine-grained substances, thereby enhancing soil anti-erodibility. It is an effective wind erosion control measure for controlling mobile sand dunes. It is recommended that when laying mechanical sand barriers on the northern edge of the Kubuqi Desert, a 1 m×1 m PLA sandbag barrier should be laid on the upper part of the windward slope, a 2 m×2 m sallow sand barrier should be laid in the middle part, and a 2 m×2 m PLA sandbag barrier should be laid on the lower part of the windward slope.

**Keywords: soil erodible *K* value; *Salix psammophila* sand barriers; polylactic acid sand barriers; reed sand barriers; Kubuqi Desert**

风蚀是人类社会面临的一个严峻的环境问题[1],土壤可蚀性指土壤对侵蚀营力分离作用和搬运作用下表现出的敏感程度,是表征地表土壤对侵蚀作用的敏感性,其是衡量土壤抗侵蚀能力的一个重要指标[2]。土壤可蚀性与土壤类型密切相关[3];不同含量的物理性砂粒土壤风蚀模拟试验,认为风蚀强度与物理性砂粒含量呈正相关[4];经模拟试验得出 0.075～0.4 mm 土壤颗粒为易蚀颗粒[5];土壤干团聚体结构、碳酸钙含量和土壤机械组成等也可作为风蚀可蚀性评价指标[5]。

机械沙障作为工程治沙的主要措施之一,通过改变下垫面性质,增加地表粗糙度,降低风速,进而减弱地表风蚀,从而起到防风固沙的作用[6-7],为植被恢复提供基础条件。而沙障因材料、规格及其配置模式的不同,其防护效果差异明显。沙柳(*Salix psammophila*)是库布齐沙漠主要的沙生乡土灌木种,沙柳沙障在鄂尔多斯范围内应用广泛;生物基可降解聚乳酸沙袋沙障(PLA 沙障)以农作物为原料,经发酵分解最终转化为 $CO_2$ 和 $H_2O$,不会污染环境,其采用"以沙治沙"的理念,铺设后可改变沙丘微地形气流特征、沙丘表层沉积物的粒度特征等[8-10]。芦苇沙障造价低廉、铺设简单、材料便捷,适合大面积铺设,芦苇沙障铺设使粗沙粒减少,细沙粒增多,并为生物结皮生长提供良好的生长环境,使植被盖度及植物种类增加[11-12]。目前,针对库布齐沙漠北缘机械沙障铺设后土壤可蚀性特征及有效防风固沙作用的配置模式鲜有明确提出。本研究采取库布齐沙漠北缘迎风坡不同设置年限铺设的 PLA 沙障、沙柳沙障和芦苇沙障不同坡位的土壤样品,分析地表 0—20 cm 深度土壤有机质和土壤粒度组成,并利用 EPIC 模型分析流动沙丘风沙土的可蚀性差异,以期明确机械沙障铺设对风沙土可蚀性特征的影响,并为防沙工程中沙障的合理应用提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗独贵塔拉镇东南约 40 km(108°53′02″E,40°26′23″N)处,属于典型温带大陆性干旱气候,四季温差大;极端最低气温－34.5 ℃,极端最高气温为 40.2 ℃,年平均温度 7.6 ℃;年均降水量为 311.8 mm[13],降水季节分布不均匀,主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 64.7%;年均潜在蒸发量为 2 498.7 mm;5—10 月蒸发量占全年蒸发量的 74%,其中一年中蒸发量最大的月份发生在 5—6 月;该地区全年以 W 和 WN 风为主,年均风速 2.8 m/s,最大风速为 7.6 m/s,其中平均风速≥5 m/s 为 323.4 次,最多年份达 418 次;境内主要是流动、半流动沙丘,土壤类型以风沙土为主;天然植被有黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、羊柴(*Hedysarum mongolicum*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)和芨芨草(*Achnatherum splendens*)等。

### 1.2　样地选取、土壤样品采集与测定

研究区内选择沙丘高度、坡度、走向等沙丘属性基本相同的流动沙丘与设置不同年限机械沙障(简称设障年限)的沙丘为试验沙丘,高度为 10～12 m,迎风坡坡度为 9°～13°,背风坡坡度为 30°～35°。3 种沙障均在迎风坡铺设,沙丘顶部留空约 4 m,其中沙柳沙障和芦苇沙障全部为死枝条;铺设方式采用半隐蔽

式;沙柳沙障(S)设障年限分别为 1 a,4 a 和 7 a,沙障规格为1 m×1 m和 2 m×2 m,其中设障 7 a 只有 1 m×1 m,PLA 沙障(P)和芦苇沙障(L)设障年限为1 a 和 4 a,PLA 沙障规格为 1 m×1 m 和 2 m×2 m,芦苇沙障铺设规格为 1 m×1 m,以附近裸沙丘作为对照(CK),无植被生长。

在迎风坡下部、中部和上部进行土样采集,每个坡位取 3 个障格,每个障格内利用五点取样法用环刀采集障格内 0—20 cm 的土样,经混合均匀后带回实验室,自然风干后过 2 mm 筛,去除植物根系和地表杂物后备用。土壤有机质(SOM)测定采用重铬酸钾容量法—外加热法[14],土壤粒径测定采用激光粒度仪。试验中机械组成颗粒粒径依据美国制(USDA)标准划分为砂粒(0.05～2 mm)、粉粒(0.002～0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)3 级,对砂粒进一步划分为石砾(1～2 mm)、粗砂(0.25～1 mm)和细砂(0.05～0.25 mm)。

### 1.3 EPIC 模型

本文根据所测定的土壤指标采用 EPIC 模型计算土壤可蚀性 $K$ 值,公式如下[15]:

$$K=\{0.2+0.3e^{\left[-0.025\,6W_a\left(1-\frac{W_i}{100}\right)\right]}\}\times\left(\frac{W_i}{W_i+W_l}\right)^{0.3}\times\left[1-\frac{0.25W_c}{W_c+e^{(3.72-2.95W_c)}}\right]\times\left[1-\frac{0.7W_n}{W_n+e^{(-5.51+22.9W_n)}}\right]$$

$$W_n=1-\frac{W_a}{100},\qquad W_c=0.058\,3W_{\mathrm{som}}$$

式中:$W_a$ 为砂粒含量(%);$W_i$ 为粉粒含量(%);$W_l$ 为黏粒含量(%);$W_c$ 为有机碳含量(%);$W_{\mathrm{som}}$为有机质含量(%)。

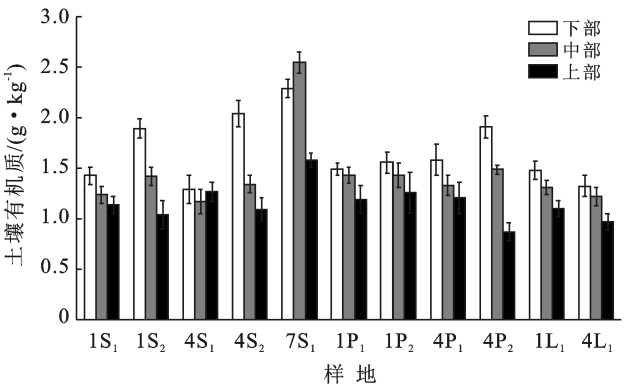
### 1.4 数据统计与分析

应用 Excel 2010 进行数据处理,所有数据均在 SPSS 26.0 统计分析软件中完成。采用 Pearson 相关系数法分析土壤有机质含量、土壤粒径组成与土壤可蚀性 $K$ 值的相关性。采用 Origin 2018 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机质含量变化规律

土壤有机质是反映土壤抗蚀性强弱的一项重要指标[16]。由图 1 可知,机械沙障铺设利于土壤有机质的积累,且 3 种机械沙障土壤有机质随着设障年限的增加而增加。土壤 0—20 cm 范围内,沙柳沙障内土壤有机质含量为 1.23～2.54 g/kg,PLA 沙障内为 1.16～1.91 g/kg,芦苇沙障内为 1.09～1.29 g/kg。相较于裸沙丘,3 种机械沙障内土壤有机质含量同期铺设的相对变化值均表现为:PLA 沙障>沙柳沙障>芦苇沙障,同期铺设相同沙障有机质含量表现为:2 m×2 m>1 m×1 m。沙柳沙障中,设障年限 1 a 和 7 a 各坡位土壤有机质含量均表现为:中部>下部>上部,设障 4 a 表现为:下部>中部>上部;PLA 沙障中各设障年限中均表现为:下部>中部>上部;芦苇沙障中,设障 1 a 表现为:中部>下部>上部,设障 4 a 表现为:下部>中部>上部。下部处,设障1 a时,各沙障综合表现为:$1P_2>1P1>1S_2>1S_1>1L_1$,设障 4 a 时,表现为:$4S_2>4P_2>4P_1>4S_1>4L_1$;中部处,设障 1 a 时,表现为:沙柳沙障>PLA 沙障>芦苇沙障;设障 4 a 时,表现为:PLA 沙障>沙柳沙障>芦苇沙障,不同设障年限均为:2 m×2 m 高于 1 m×1 m,且 $1S_2$,$4P_2$ 分别最高为:1.35 g/kg 和1.49 g/kg;上部处,设障 1 a 时,表现为:$1S_2>1P_1>1P_2>1S_1>1L_1$,设障 4 a 时,表现为:$4P_2>4S_2>4S_1>4P_1>4L_1$。




注:S 为沙柳沙障,P 为生物基可降解聚乳酸(PLA)沙袋沙障,L 为芦苇沙障;字母前的数字为设置沙障的年限,字母下角标为设置沙障的规格。例如:$1S_1$ 表示设障 1 a,规格为 1 m×1 m 的沙柳沙障,其他依次类推。下同。

**图 1 机械沙障土壤有机质含量**

### 2.2 土壤粒径分布变化规律

土壤粒径的分布对土壤侵蚀过程具有一定的指示作用[17]。由表 1 可知,研究区内 3 种机械沙障黏粒、粉粒和细砂体积百分含量随设障年限的增加呈增加趋势;且不同设障年限土壤粒径组成存在差异,土壤 0—20 cm 范围内均以细砂为主。沙柳沙障中,粒径由小到大各粒级体积百分含量均值分别为 7.86%,8.65%,67.92%,6.19%和 9.38%;PLA 沙障中分别为 6.97%,7.88%,66.09%,9.07%和 9.99%;芦苇沙障中分别为 6.85%,7.77%,67.66%,9.24%和 8.49%,表明沙障不仅具有固定地表流沙的作用,同时设障后能够拦截大气中的粉尘物质,使之在障内堆积,使黏

粒、粉粒和细砂含量增加。在迎风坡下部,设障 1 a 时细物质体积百分含量表现为:$1P_2>1P_1>1S_2>1L_1>1S_1$,设障 4 a 时表现为:$4P_2>4P_1>4L_1>4S_2>4S_1$;在迎风坡中部,设障 1 a 和 4 a 时细物质体积百分含量分别表现为:$1S_2>1S_1>1P_1>1L_1>1P_2$,$4S_1>4S_2>4L_1>4P_1>4P_2$;迎风坡上部设障 1 a 和 4 a时分别表现为:$1S_2>1S_1>1P_1>1P_2>1L_1$,$4P_1>4S_1>4L_1>4S_2>4P_2$。

**表 1　机械沙障土壤粒径组成的体积百分含量**　　%

| 沙障 | 机械沙障下部 | | | | | 机械沙障中部 | | | | | 机械沙障上部 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 黏粒 | 粉粒 | 细砂 | 粗砂 | 石砾 | 黏粒 | 粉粒 | 细砂 | 粗砂 | 石砾 | 黏粒 | 粉粒 | 细砂 | 粗砂 | 石砾 |
| $1S_1$ | 6.18 | 7.78 | 65.58 | 8.58 | 11.88 | 5.86 | 7.23 | 72.52 | 5.38 | 9.01 | 6.09 | 7.35 | 69.83 | 7.39 | 9.34 |
| $1S_2$ | 6.26 | 7.48 | 67.25 | 6.94 | 12.07 | 5.93 | 7.05 | 72.88 | 5.1 | 9.04 | 6.17 | 7.25 | 70.37 | 7.66 | 8.55 |
| $4S_1$ | 6.98 | 8.04 | 65.29 | 8.1 | 11.59 | 8.61 | 9.17 | 68.71 | 4.32 | 9.19 | 9.59 | 11.61 | 64.42 | 5.71 | 8.67 |
| $4S_2$ | 7.93 | 8.13 | 65.96 | 6.43 | 11.55 | 8.76 | 9.04 | 67.71 | 5.52 | 8.97 | 7.76 | 8.83 | 62.77 | 7.69 | 12.95 |
| $7S_1$ | 11.78 | 10.56 | 66.69 | 5.89 | 5.08 | 12.47 | 10.23 | 67.89 | 3.34 | 6.07 | 10.55 | 10.07 | 67.93 | 4.75 | 6.7 |
| $1P_1$ | 6.07 | 7.28 | 68.87 | 8.78 | 9.00 | 5.08 | 7.08 | 69.5 | 8.97 | 9.37 | 5.98 | 7.15 | 68.81 | 9.08 | 8.98 |
| $1P_2$ | 6.95 | 7.87 | 68.88 | 10.93 | 5.37 | 6.08 | 7.05 | 64.73 | 9.37 | 12.77 | 6.71 | 7.35 | 66.99 | 9.1 | 9.85 |
| $4P_1$ | 7.94 | 7.83 | 68.25 | 7.08 | 8.9 | 7.38 | 7.74 | 63.85 | 7.55 | 13.48 | 7.29 | 10.4 | 69.27 | 5.01 | 8.03 |
| $4P_2$ | 9.39 | 9.36 | 66.02 | 11.54 | 3.69 | 7.74 | 8.08 | 60.43 | 10.19 | 13.56 | 7.08 | 7.42 | 57.42 | 11.23 | 16.85 |
| $1L_1$ | 6.52 | 7.21 | 66.44 | 10.25 | 9.58 | 6.28 | 6.94 | 68.07 | 9.65 | 9.06 | 6.34 | 7.09 | 67.39 | 9.87 | 9.31 |
| $4L_1$ | 7.09 | 8.33 | 69.63 | 8.56 | 6.39 | 7.35 | 8.56 | 67.27 | 8.46 | 8.36 | 7.49 | 8.47 | 67.17 | 8.63 | 8.24 |

### 2.3　土壤可蚀性 *K* 值变化规律

土壤可蚀性反映土壤对侵蚀的敏感程度[18]。由表 2可知,沙障的铺设会降低土壤可蚀性,且各沙障间土壤可蚀性无显著差异($p<0.05$)。随着设障年限的延长土壤可蚀性降低。不同坡位土壤可蚀性 $K$ 值的最大值是最小值的 1.8 倍,$K$ 值变化较为均匀。3 种机械沙障各坡位土壤可蚀性 $K$ 值整体表现为上部>中部>下部。迎风坡下部,设障 1 a 后,3 种机械沙障的土壤可蚀性 $K$ 值表现为:$1L_1>1S_2>1P_1>1P_2>1S_1$,设障 4 a 后,表现为:$4L_1>4S_1>4P_1>4P_2>4S_2$。迎风坡中部,设障 1 a 后,土壤可蚀性 1 m×1 m 规格高于 2 m×2 m,且 PLA 沙障内土壤可蚀性最高,2 种规格下分别为0.174 8 mg·hm²·h/(hm²·MJ·mm)和0.166 8 mg·hm²·h/(hm²·MJ·mm),设障 4 a 后,表现为:$4L_1>4S_1>4S_2>4P_1>4P_2$;迎风坡上部,设障 1 a和4 a,土壤可蚀性皆表现为 1 m×1 m 规格高于 2 m×2 m,且皆沙柳沙障的最高,2 种规格下分别为0.176 9,0.174 6 mg·hm²·h/(hm²·MJ·mm)和0.185 6,0.171 5 mg·hm²·h/(hm²·MJ·mm)。

由表 3 可知,土壤可蚀性 $K$ 值与土壤有机质呈极显著($p<0.01$)负相关,表明土壤可蚀性 $K$ 值随土壤有机质含量的增大而减小,土壤抗侵蚀能力就增强,土壤受侵蚀风险就越小;土壤可蚀性 $K$ 值与土壤砂粒、黏粒含量呈负相关,与粉粒含量呈正相关,但其相关性较小。

**表 2　2 种机械沙障土壤可蚀性 *K* 值**

| 沙障 | 土壤可蚀性 $K$ 值/〔mg·hm²·h·(hm²·MJ·mm)⁻¹〕 | | |
|---|---|---|---|
| | 下 部 | 中 部 | 上 部 |
| $1S_1$ | 0.103 0 | 0.172 6 | 0.176 9 |
| $1S_2$ | 0.169 8 | 0.166 5 | 0.174 6 |
| $4S_1$ | 0.166 2 | 0.171 8 | 0.185 6 |
| $4S_2$ | 0.150 1 | 0.164 2 | 0.171 5 |
| $7S_1$ | 0.151 2 | 0.148 5 | 0.160 1 |
| $1P_1$ | 0.168 0 | 0.174 8 | 0.175 0 |
| $1P_2$ | 0.166 8 | 0.166 9 | 0.174 0 |
| $4P_1$ | 0.156 2 | 0.162 1 | 0.183 5 |
| $4P_2$ | 0.153 1 | 0.160 7 | 0.167 0 |
| $1L_1$ | 0.175 4 | 0.172 1 | 0.176 9 |
| $4L_1$ | 0.171 2 | 0.172 5 | 0.176 4 |

**表 3　土壤有机质和土壤粒度组成与土壤可蚀性 *K* 值的相关系数**

| 项 目 | 黏粒含量 | 粉粒含量 | 砂粒含量 | 土壤有机质含量 |
|---|---|---|---|---|
| 土壤可蚀性 $K$ 值 | −0.048 | 0.088 | −0.225 | −0.471** |

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

## 3　讨 论

本研究表明,机械沙障铺设使土壤有机质含量增加。机械沙障的铺设降低了风蚀损失,截获降尘和风沙流中细粒组分,使其携带的养分在障格内积累、分解;障格内植被生长、土壤生物结皮发育,生物作用明显[19],使流沙环境中土壤有机质的流失减弱,从而土壤有机质在障格内积累;且沙障的铺设利于植被恢

复,随着植被凋落物的分解及根系分泌物增多,皆有利于土壤有机质含量积累[20]。迎风坡上部土壤有机质含量相对较少,除此之外,各沙障土壤有机质含量均表现为:下部>中部>上部。因为铺设机械沙障后,沙丘中部、上部接受太阳辐射较多,水分蒸发相对较快,环境条件相对较差,稳定性差,风蚀损失相对严重[21]。由于缺乏植物根系和凋落物,坡上对风力和雨水的侵蚀较为敏感,营养物质流失较为严重。凋落物和草本植物的腐化与土壤水分等环境条件有关[22],沙丘下部植被覆盖度相对较高,一定程度上减少降雨和风力对土壤的侵蚀作用。相关研究[23-26]表明,一定范围内,坡位会影响土壤有机质含量,受重力影响沙丘上部水土保持能力较差,从而影响土壤养分再分配情况,使得中部和上部养分会向下部流失,沙丘下部土壤有机质含量较高。本研究表明,2 m×2 m的沙柳沙障土壤有机质含量较高。可能原因是由于在沙障布设早期,作为布障材料的沙柳枝条内带有一定养分,比PLA沙障对土壤有机质含量的影响大;其次相比1 m×1 m障格内蚀积情况不稳定,2 m×2 m障格内形成了稳定凹曲面,利于土壤有机质含量的积累。

土壤粒径分布是指不同粒级的土壤颗粒重量占土壤颗粒总重量的百分比,它既是土壤分类的重要依据,又是影响土壤可蚀性的重要因素[27]。相关研究表明,沙障的铺设使土壤黏粒、粉粒和细砂含量增加,且各坡位下增幅不同,随设障年限的增加其呈增加趋势。土壤细物质含量增加,是因为沙障的铺设使地表粗糙度增大,气流的阻力增大,气流能量损失,地表风速削弱,使得风沙流中的沙粒在障格内沉降[28],而各坡位土壤颗粒含量增加幅度不同,是由于风沙流中沙粒的沉降,使得坡底向坡顶的风沙流不饱和,且沙障固定了地表沙源,坡下至坡上风沙流能量逐渐减弱且无沙粒补给,所以从迎风坡下部至上部土壤颗粒沉降逐渐减少[29,7,9];同时土壤有机质含量所测结果也表明,沙丘下部土壤有机质含量相对较高,能够较好地提高风沙土的团聚性,从而维持土壤大团聚体的稳定性[30]。

土壤可蚀性 $K$ 值是衡量土壤对侵蚀敏感程度和进行土壤侵蚀预报的重要参数[31],$K$ 值越大,土壤抗侵蚀能力就越低,就越容易发生侵蚀。本研究表明,土壤可蚀性随设障年限的增加而降低;因为随设障年限的增加,机械沙障捕获细物质,并逐渐积累、分解,同时固氮植物和结皮不断发育,生物也逐渐定居,生物作用逐渐加强,土壤水肥效益加强[32],改变砂粒松散的状态,同时生物作用使障格内地表粗糙度增加,皆提高了土壤的抗蚀性,使得土壤可蚀性 $K$ 值降低。本研究表明各立地条件下沙丘下部障格内土壤抗蚀性强,同时土壤可蚀性 $K$ 值与土壤有机质含量呈极显著($p<0.01$)负相关,表明土壤有机质含量越高,土壤抗侵蚀能力越强;因为土壤有机质会合成腐殖质等有机胶体,与风沙土中黏粒复合成胶体,可以提高砂土的团聚性,改善砂粒过于松散的状态,从而增强土壤抗蚀性,使土壤可蚀性降低;机械沙障的铺设,使土壤有机质增加,促进植被恢复,增加地表粗糙度,降低土壤可蚀性,且植物根系使小粒径团粒凝聚成更大粒径的土壤团粒,结合土壤有机质,增加中等粒径团聚体含量,改善土壤结构,提高土壤稳定性,对增加土壤抗蚀性起到重要作用[33]。本研究表明设障1 a后,各坡位2种规格下障格内土壤可蚀性无明显变化趋势,设障4 a后,2种规格下土壤可蚀性 $K$ 值皆表现为2 m×2 m铺设规格下土壤抗侵蚀能力强于1 m×1 m。产生原因如下:1 m×1 m规格障格内沉积物堆积强度大于侵蚀速率,障格内蚀积特征不稳定,不利于短期内障格内的生物作用;设障4 a后,2 m×2 m障格内可有效控制易蚀颗粒不被风沙携带,使障格内达到蚀积平衡,形成稳定凹曲面[34],利于障格内生物作用的加强,2 m×2 m沙障的持续防护能力增强。

## 4 结论

(1) 沙障铺设后利于土壤有机质含量增加,其中2 m×2 m沙柳沙障对土壤有机质的积累效果最好,且迎风坡上部土壤有机质含量相对较少。

(2) 沙障铺设使得障格内黏粒、粉粒和细砂含量增加,随设障年限的增加其呈增加趋势;土壤0—20 cm范围内均以细砂为主。

(3) 铺设机械沙障可降低土壤可蚀性,各立地条件下沙丘下部障格内土壤抗蚀性最好;3种机械沙障中沙柳沙障抗蚀性较高;且随设障年限增加障格内土壤抗蚀性增强,设障4 a后,2 m×2 m铺设规格障格内的土壤受侵蚀风险较小;土壤可蚀性 $K$ 值与土壤有机质含量呈极显著($p<0.01$)负相关。

沙障铺设使土壤有机质含量增加,利于细粒物质的积累,增强土壤抗蚀性,是治理流动沙丘有效的风蚀防治措施,建议在库布齐沙漠北缘铺设机械沙障时,可采用迎风坡上部铺设1 m×1 m的PLA沙障,中部铺设2 m×2 m的沙柳沙障,下部铺设2 m×2 m的PLA沙障的模式。

[ 参 考 文 献 ]

[1] Bewket W, Teferi E. Assessment of soil erosion hazard and prioritization for treatment at the watershed level:

Case study in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia [J]. Land Degradation & Development, 2010, 20(6):609-622.

[2] 林芳,朱兆龙,曾全超,等.延河流域 3 种土壤可蚀性 $K$ 值估算方法比较[J].土壤学报,2017,54(5):1136-1146.

[3] 南岭,杜灵通,展秀丽.土壤风蚀可蚀性研究进展[J].土壤,2014,46(2):204-211.

[4] 董治宝,李振山.风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,12(4):3-5.

[5] 董治宝,钱广强.关于土壤水分对风蚀起动风速影响研究的现状与问题[J].土壤学报,2007,44(5):934-942.

[6] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头 60 年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.

[7] 高永,邱国玉,丁国栋,等.沙柳沙障的防风固沙效益研究[J].中国沙漠,2004,24(3): 365-370.

[8] 党晓宏,高永,虞毅,等.新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益[J].北京林业大学学报,2015,37(3):118-125.

[9] 李锦荣,孙保平,高永,等.基于空气动力学的沙袋沙障气流场模拟[J].北京理工大学学报,2010,30(6):749-752.

[10] 党晓宏,虞毅,高永,等.PLA 沙障对沙丘土壤粒径的影响分析[J].水土保持研究,2014,21(3):16-19.

[11] 石涛.光伏电站芦苇沙障防风固沙效益研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.

[12] 王文彪,党晓宏,张吉树,等.库布齐沙漠北缘不同作物秸秆平铺式沙障的防风效能[J].中国沙漠,2013,33(1):65-71.

[13] 张威.沙障在流动沙丘造林中的作用机制及效益研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.

[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[15] 汪邦稳.安徽省土壤可蚀性 K 值及其分布特征[J].中国水土保持科学,2019,17(6):132-139.

[16] 葛佩琳,王凌云,莫明浩,等.鄱阳湖滨流动沙丘不同类型沙障土壤改良效应分析[J].水土保持研究,2019,26(6):87-91.

[17] 刘铮瑶,董治宝,赵杰,等.人工固沙措施对沙丘沉积物特征及土壤养分的影响[J].生态学报,2020,40(4):1383-1391.

[18] 张天宇,尚晨晨,韩笑.东北地区坡耕地主要土种土壤可蚀性估算[J].土壤通报,2020,51(3):529-537.

[19] 陈志超,李宁,刘昌华.古尔班通古特沙漠草方格沙障对土壤养分的影响[J].草业科学,2013,30(5):699-702.

[20] 柴成武,王理德,尉秋实,等.民勤青土湖区不同年限退耕地土壤颗粒组成和养分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(4):99-104.

[21] 李晓佳,姜洪涛,周瑞平,等.腾格里沙漠东缘沙障布设方式对土壤理化性质的影响[J].水土保持研究,2020,27(5):50-58.

[22] 丁文广,魏银丽,杨军梅,等.甘肃省中部干旱区植被恢复对土壤养分变化的影响研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(1):159-163.

[23] 刘歌畅,王安宁,陈海鹏,等.冀北沙荒地不同坡位黄柳生物沙障对物种组成及多样性的影响[J].西南农业学报,2018,31(8):1700-1705.

[24] 高雪松,邓良基,张世熔.不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J].水土保持学报,2005,19(2):53-56.

[25] 赵海霞,李波,刘颖慧,等.皇甫川流域不同尺度景观分异下的土壤性状[J].生态学报,2005,25(8):2010-2018.

[26] 刘世梁,郭旭东,连纲,等.黄土高原土壤养分空间变异的多尺度分析:以横山县为例[J].水土保持学报,2005,19(5):107-110.

[27] 王德,傅伯杰,陈利顶,等.不同土地利用类型下土壤粒径分形分析:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2007,27(7):3081-3089.

[28] 黎小娟,周智彬,李宁,等.尼龙网方格沙障风沙流携沙粒度的空间分异特征[J].中国沙漠,2018,38(1):76-84.

[29] 丁延龙,高永,汪季,等.生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障对沙丘表层沉积物粒度特征的影响[J].中国沙漠,2018,38(2):262-269.

[30] 许婷婷,董智,李红丽,等.不同设障年限沙丘土壤粒径和有机碳分布特征[J].环境科学研究,2014,27(6):628-634.

[31] 周宁,李超,琚存勇,等.黑龙江省土壤可蚀性 $K$ 值特征分析[J].农业工程学报,2015,31(10):182-189.

[32] 陈志超,李宁,刘昌华.古尔班通古特沙漠草方格沙障对土壤养分的影响[J].草业科学,2013,30(5):699-702.

[33] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.

[34] 王艺钊,原伟杰,丁国栋,等.聚乳酸(PLA)沙障凹曲面及沉积物粒度特征研究[J].干旱区地理,2020,43(3):671-678.