# 生物基可降解聚乳酸沙障的蚀积特征

刘湘杰[1]，党晓宏[1,2]，汪 季[1,2]，丁延龙[1]，焦宏远[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系统国家定位观测研究站，内蒙古 鄂尔多斯，017400）

**摘 要**：[目的] 分析不同铺设规格生物基可降解聚乳酸(PLA)沙障障格内风蚀稳定凹曲面形态特征、断面轮廓及蚀积效应等指标，为聚乳酸沙袋沙障规格优选提供理论依据。[方法] 以内蒙古自治区吉兰泰盐湖周边流动沙垄铺设的 0.5 m×0.5 m，1 m×1 m，1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m 规格的聚乳酸沙袋沙障为研究对象，待风季后测量障格内稳定凹曲面蚀积形态，绘制凹曲面形态图并计算蚀积参数等。[结果] 4 种规格沙障障格内均能形成稳定的凹曲面，且呈四周高中间低的整体格局。0.5 m×0.5 m，1 m×1 m，1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m 障格内的净堆积强度分别为 17.29，7.09，0.61，−8.2 g/cm$^2$。[结论] 障格内稳定的凹曲面形成前，0.5 m×0.5 m 和 1 m×1 m 障格内以堆积为主；1.5 m×1.5 m 障格内风蚀堆积近乎平衡；2 m×2 m 障格内部在布设初期呈风蚀状态，但稳定凹曲面形成后，仍可控制地表风蚀。

**关键词**：蚀积特征；凹曲面；沙袋沙障；生物基可降解；吉兰泰盐湖

**文献标识码**：A **文章编号**：1000-288X(2019)05-0113-07 **中图分类号**：S775，TB30

**文献参数**：刘湘杰，党晓宏，汪季，等.生物基可降解聚乳酸沙障的蚀积特征[J].水土保持通报，2019，39(5)：113-119. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.016；Liu Xiangjie，Dang Xiaohong，Wang Ji，et al. Characteristics of eosion and deposition of biodegradable poly lactic acid checkerboard barriers[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：113-119.

# Characteristics of Erosion and Deposition of Biodegradable Poly Lactic Acid Checkerboard Barriers

Liu Xiangjie[1]，Dang Xiaohong[1,2]，Wang Ji[1,2]，Ding Yanlong[1]，Jiao Hongyuan[1]

（1. *College of Desert Control Science and Engineering，Inner Mongolia Agricultural University，Hohhot，Inner Mongolia* 010018，*China*；2. *National Positioning Observation Research Sation of Hangjin Desert Ecosystem，Ordos，Inner Mongolia* 017400，*China*）

**Abstract**：[Objective] Morphological characteristics，different orientation section profile characteristics，and erosion and deposition effects of concave surfaces of biodegradable poly lactic acid (PLA) checkerboard barriers with different sizes were analyzed to provide evidence on which to base the specification parameter selection of PLA checkerboard barriers. [Methods] The biodegradable sandbag checkerboard barriers laid on the edge of the Jilantai Salt Lake in the Inner Mongolia Autonomous Region were undertaken for research. The sizes of the checkerboard were 0.5 m×0.5 m，1 m×1 m，1.5 m×1.5 m，and 2 m×2 m. The shape of the concave surface was measured，pictures of the shape of the concave surface were drawn，and the parameters of the erosion and deposition after the wind period were calculated. [Results] A sand surface can form a stable concave surface for the four kinds of PLA checkerboard barrier. The center was lower than the surrounding parts in the PLA checkerboard barriers. The strengths of net deposition in the 0.5 m×0.5 m，1 m×1 m，1.5 m×1.5 m，and 2 m×2 m PLA checkerboard barriers were 17.29，7.09，0.61，and −8.2 g/cm$^2$，respectively. [Conclusion] Before the stable formation of the concave surface，the sand grains of the PLA checkerboard barriers of 0.5 m×0.5 m and 1 m×1 m were mainly deposition. The volume of erosion and deposition was close to equilibrium in the 1.5 m×1.5 m PLA checkerboard barriers. The sand surface was

**收稿日期**：2019-02-26 **修回日期**：2019-04-03

**资助项目**：国家重点研发计划项目“绿洲、盐碱湖区沙害防治关键技术研究与示范”(2016YFC0501003)；内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(NDYB2016-08)

**第一作者**：刘湘杰(1992—)，男(汉族)，内蒙古自治区巴彦淖尔市人，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治。E-mail：584608079@qq.com。

**通讯作者**：汪季(1957—)，男(汉族)，山东省济南市人，博士，教授，博士生导师，现主要从事荒漠化防治研究。E-mail：wangji1957@163.com。

wind eroded at the initial stage in the PLA checkerboard barriers of 2 m×2 m, but when the sand surface formed a stable concave surface, the PLA checkerboard barriers could control wind erosion of the sand surface.

**Keywords: erosion and deposition characteristics; concave surface; sandbag barriers; biodegradable; Jilantai Salt Lake**

风沙灾害是中国北方地区面临的最严重的生态威胁之一[1-2],对农田、工矿区、交通线路和居民点等造成严重影响,并制约区域社会经济可持续发展,亟待采取措施进行治理[3-4]。在沙丘活动较强、水资源匮乏的地区,机械沙障已成为治理沙害的一种行之有效的措施[5-6],沙障材料较多,比如:麦草沙障[7-8]、沙柳沙障[9]和黏土沙障[10]等。20 世纪 60 年代,许多专家就对方格状沙障进行了深入研究[11],并且取得了丰硕的成果。目前,方格状沙障仍是许多学者研究的对象[12-13]。方格沙障能否起到防风固沙的作用,其稳定的凹曲面形成是关键[14]。

风沙流通过沙障时,在障格内部会形成短轴与沙障高度接近,长轴为障高 5～6 倍的椭圆形涡流[15],在涡流的作用下,障格内原始沙面经过充分蚀积后会达到平衡状态,即形成稳定的凹曲面。屈建军等[14]认为格状沙障蚀积系数满足 1/10～1/8 之间才能形成稳定的凹曲面。张登山等[16]通过对青海湖 6 种规格草方格沙障蚀积效应进行评定,得出凹曲面侵蚀强度与沙障规格大小呈正相关。周娜等[17]对草方格内部气流场进行模拟,得出气流在草方格障体前受阻滞减速,穿过草方格时,受狭管效应,在障格内形成加速区,对障格中心沙面风蚀,形成障格内中间低四周高的凹曲面。一般通过凹曲面形态、蚀积系数和蚀积强度来表征凹曲面特征,反映过境风沙流通过沙障时障格内部地表起伏变化,是衡量沙障防风固沙效果的重要手段,常作为沙障规格选取的重要依据[14-16]。

方格沙障规格参数的选取还需要考虑沙障材料的防护寿命,如传统麦草沙障地上部分在风打沙割及日光照射下老化较快,同时在铺设时一部分需埋入沙面以下,地下部分也易腐烂,导致其使用年限减少。沙漠地区秸秆、黏土、砾石等传统沙障材料资源匮乏,加之交通不便,大大增加了沙害治理的难度[18]。生物可降解聚乳酸(poly lactic acid)沙障(以下简称 PLA 沙障)采用木薯淀粉等天然原料生成,遵循“以沙治沙”理念,就地取材,将沙物质装入沙袋中铺设于地表,既可有效控制地表风沙活动,且在沙障铺设 5 a 后性能仍较为稳定[19],其可完全分解为二氧化碳和水[18],对沙区环境不会产生二次污染,是一种应用前景极广阔的防风固沙材料。目前对此沙障材料特性[19]、防风固沙效益[20-24]、对土壤物理性质影响[25-26]和对沙区植被恢复的作用[18,27]等方面均有相关研究。障格内蚀积特征作为障格间距确定的依据具有重要意义[14,16],本文通过对 PLA 沙障障格内凹曲面形态和土壤蚀积特征进行定量描述,旨在揭示不同规格 PLA 沙障障格内的蚀积规律,为今后 PLA 沙障规格设置提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古阿拉善左旗吉兰泰镇北部 5 km处的自然保护区内,地处乌兰布和沙漠西南缘。该地区属于典型的温带大陆性干旱气候,冬季严寒,夏季炎热,气温年、日差较大,极端最低气温－31.2 ℃,极端最高气温 40.9 ℃,年均气温 8.6 ℃;干旱少雨,蒸发量大,年均降水 109.9 mm,年均蒸发量 3 005.2 mm;风力强劲,沙源物质丰富,冬季盛行西北风,夏季盛行西南风和东北风,风力平均 4～5 级,平均风速 3.6 m/s,最大瞬时风速 24 m/s,年均扬沙日数 82.5 d,年均风沙流频率 112.9 次。在风力长期作用下,盐湖北部形成大量西北—东南走向、长度数百米的巨大沙垄。土壤种类主要为灰漠土、风沙土和盐渍土,间有盐化草甸土出现。植物资源贫乏,结构单一,以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、阿拉善沙拐枣(*Calligonum alaschanicum*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等荒漠植被为主。

### 1.2 研究内容与方法

1.2.1 *样地布设* 在试验区选取西北—东南走向的的沙垄,沙垄长 250 m,宽 30 m,沙垄两侧不对称,西北坡坡度 12°～13°,东北坡坡度 25°～26°。沙垄顶部平坦宽阔,宽度大于 15 m。在沙垄西北坡,沿坡底向沙垄顶部铺设 PLA 沙障,沙障内填充风积沙后就地铺设于沙表面,障体呈筒状,障高约 10 cm,自南向北沙障规格依次为 0.5 m×0.5 m,1 m×1 m,1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m,每种规格区面积约为 200 $m^2$,间隔 20 m。

1.2.2 *凹曲面形态测量* 为避免地形干扰,选择沙垄顶部平坦处的障格为研究对象,每种规格选取 10 个障格作为重复。在风季前对障格内进行人为整平,风季结束后对凹曲面采用悬测法进行测量[16]。沿方格对角线和平行边中点连线布设测线(方格的 4 条对

称轴),4 条测线呈“米”型,将障格划分为 8 个方位区。沿测线两头拉直皮尺,而后用激光测距仪沿皮尺每隔 5 cm 测量皮尺到沙面的距离,同时记录测点到起点(点 NW,N,NE 和 E)的相对距离,记为 $X$。并在每个方位区内选择 5～10 个点测量皮尺到沙面的距离,以补充测线间的空白区域。

凹曲面与原沙面相对高差计算公式。

$$Y=H-h \tag{1}$$

式中:$Y$——凹曲面与原始沙面相对高差(cm);$H$——沙障障高(cm);$h$——皮尺到凹曲面的距离(cm);$Y>0$ 表示堆积,$Y<0$ 表示风蚀。

1.2.3　数据处理　利用 Surfer 8.0 的空间插值和三维空间分析功能,分别绘制障格内凹曲面形态图和计算障格内沙粒蚀积体积。采用 Origin 2017 拟合障格内蚀积深度曲线在不同方位变化规律。通过适用范围和插值的优缺点对 12 种空间插值方法进行筛选验证,筛选出 6 种空间插值方法(克里格法、径向基函数法、自然临点法、最近临点法、局部多项式法和带线性插值的三角剖分法)进行交叉验证,确定最优空间插值方法,评价指标如下[28]:

(1) 残差计算公式。

$$Z_{res}=Z_{dat}-Z_{grd} \tag{2}$$

式中:$Z_{res}$——残差值;$Z_{dat}$——障格内蚀积深度;$Z_{grd}$——该点模拟值。

(2) 平均估计误差百分比计算公式。

$$PAEE=\frac{100\%}{\overline{Z}_i n_i}\sum_{k=1}^{n_i}[Z_i^*(X_k)-Z_i(X_k)]^2 \tag{3}$$

式中:$Z_i^*(X_k)$——位置 $X_k$ 处随机变量 $Z_i$ 估计值;$Z_i(X_k)$——位置 $X_k$ 处的样点值;$\overline{Z}_i$——样点平均值。

(3) 相对均方差计算公式。

$$RMSE=\frac{1}{s^2 n_i}\sum_{k=1}^{n_i}[Z_i^*(X_k)-Z_i(X_k)]^2 \tag{4}$$

式中:$s^2$——样点方差。

(4) 均方根 预测误差计算公式。

$$RMSPE=\sqrt{\frac{1}{n_i}\sum_{k=1}^{n_i}[Z_i^*(X_k)-Z_i(X_i)]^2} \tag{5}$$

分析每种方法的平均残差、均方根预测误差、相对误差和误差百分比进行筛选,筛选依据为计算值越小,效果越好,最终确定最优空间插值方法,通过计算分析本文选择克里格方法进行空间插值。

蚀积参数常用指标包括蚀积系数、堆积强度、侵蚀强度和净堆积强度等[15]。其中凹曲面深度、障格边长和障格表面积为实测值,蚀积量是通过 Surfer 8.0 求得障格内蚀积体积后与沙粒密度乘积求得。计算公式如下:

①蚀积系数。

$$a=\frac{H}{L} \tag{6}$$

式中:$a$——蚀积系数;$H$——凹曲面中心深度(cm);$L$——为障格边长(cm)。

②蚀积/堆积强度。

$$R=\frac{M_{蚀积}}{S} \tag{7}$$

式中:$Q$——风蚀强度或堆积强度(g/cm$^2$);$M$——风蚀量或堆积量(g);$S$——障格规格表面积(cm$^2$)。

③净堆积强度。

$$Q_{净}=Q_{堆积}-Q_{侵蚀} \tag{8}$$

式中:$Q_{净}$——净堆积强度(g/cm$^2$);$Q_{堆积}$——堆积强度(g/cm$^2$);$Q_{侵蚀}$——侵蚀强度(g/cm$^2$)。

④PLA 沙障障格内不同方位轮廓断面拟合方程。

$$Y=aX^2+bX+c \tag{9}$$

式中:$Y$——充分蚀积后凹曲面与原始沙面的相对高差(cm);$X$——不同方位线上所取测量点距测量起点的投影距离(cm)。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同规格障格蚀积凹曲面特征

沙障障格内凹曲面形态是对地表蚀积状况最直观的反映,也是衡量沙障效果的重要指标。当风沙流通过沙障时,沙障影响流场和近地表风沙流结构,从而改变了地的蚀积状况。沙障规格的差异导致蚀积程度不同(见图 1)。在经历一个风季后,对障格凹曲面进行测量,不同规格障格内蚀积差异明显,但整体均呈中间低四周高,凹曲面中心深度随着沙障规格的增大而加深,最深风蚀深度可达 13 cm。障格四周为风沙流阻滞区,呈堆积状态,堆积平均高度为 6.29 cm。

由表 1 可知,随着沙障规格的增大,障格内中心平均风蚀深度从 6.70 cm 增加到 23.00 cm。4 种规格沙障蚀积系数均在 1/8～1/10 之间,即障格内风蚀深度达到障格边长的 1/8～1/10,属于格状沙障边长与风蚀深度稳定比例[13]。在同一个障格内的不同区域,风蚀和堆积同时存在,风蚀强度随着障格规格的增大呈增大趋势,堆积强度与之相反。在障格稳定凹曲面形成前,其内部不同部位呈现蚀积动态过程。通过对比凹曲面形成前障格内的净堆积强度(以原沙面为基准),可知 PLA 障格内在凹曲面形成过程中,0.5 m×0.5 m和 1 m×1 m 障格内沙物质堆积量大于风蚀量,净堆积强度分别为 17.29 g/cm$^2$ 和 7.09 g/cm$^2$,

障格内大量积沙;1.5 m×1.5 m 障格内堆积量与风蚀量接近,净堆积强度为 0.61 g/cm$^2$,障格内积沙量较少;而 2 m×2 m 障格内风蚀量大于堆积量,净堆积强度为−8.2 g/cm$^2$,障格内沙物质被风蚀。

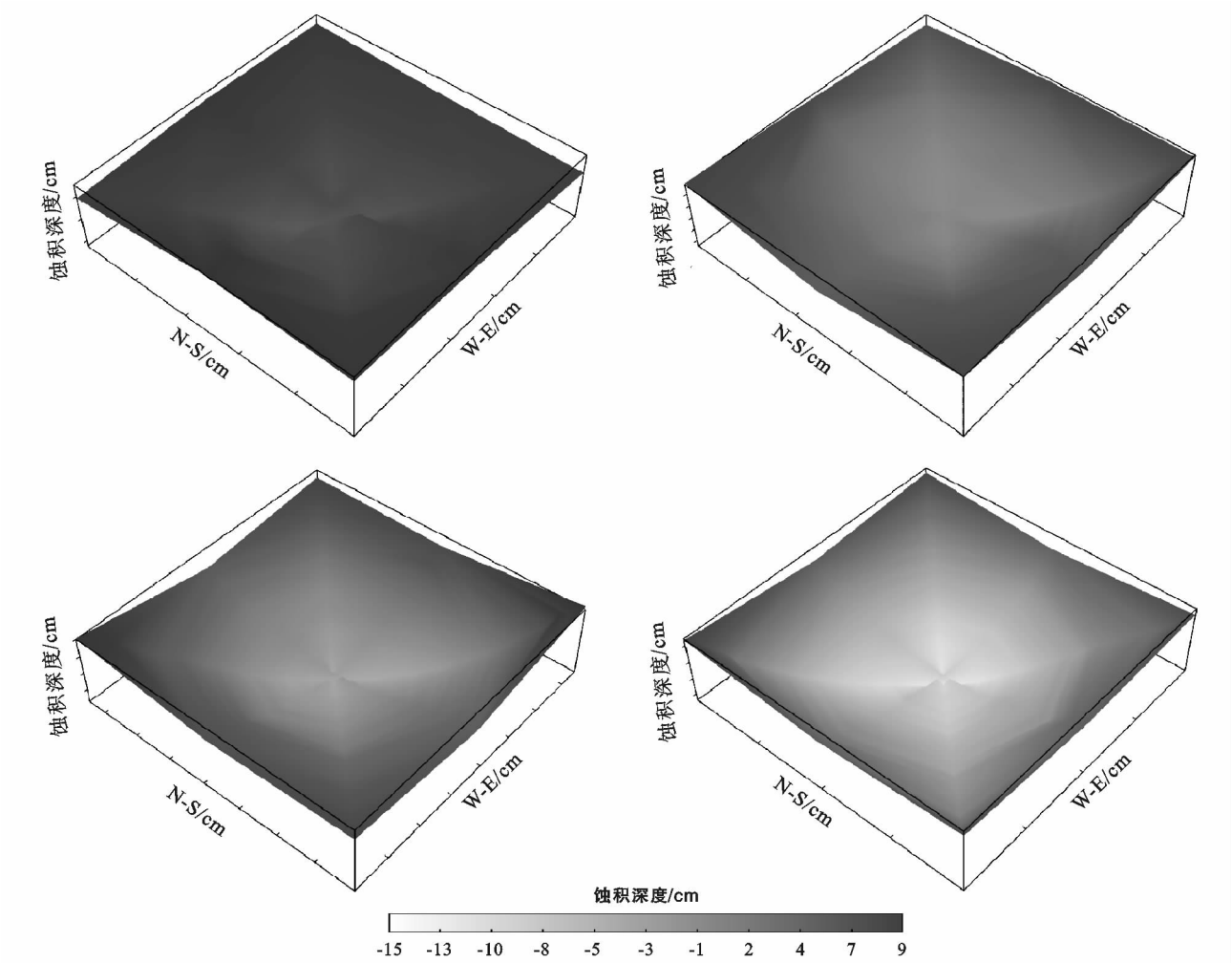



**图 1 不同规格 PLA 沙障蚀积凹曲面拟合特征**

**表 1 不同规格 PLA 沙障障格内蚀积特征**

| 规 格 | 凹曲面深度/cm | 蚀积系数 | 风蚀强度/(g·cm$^{-2}$) | 堆积强度/(g·cm$^{-2}$) | 净堆积强度/(g·cm$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.5 m×0.5 m | 6.70 | 1/8 | 0 | 17.29 | 17.29 |
| 1 m×1 m | 12.62 | 1/8 | 0.33 | 7.42 | 7.09 |
| 1.5 m×1.5 m | 15.54 | 1/10 | 3.75 | 4.36 | 0.61 |
| 2 m×2 m | 23.00 | 1/8 | 9.01 | 0.81 | −8.2 |

注:净堆积强度为堆积强度与风蚀强度差值,正值代表凹曲面形成过程中障格内沙粒堆积,负值代表风蚀。

## 2.2 障格内不同方位蚀积剖面特征

图 2 为不同规格 PLA 沙障障格内不同方位蚀积深度变化。4 种规格 PLA 沙障内 NW-SE 和 NE-SW 两个方向中心深度较其他两个方位更深,风蚀量更大,这与研究区风季主害风方向为 NW-SE 和 NE-SW 相符合[14,25]。在凹曲面形成过程中(以原沙面为基准),PLA 沙障障格内 4 条方位线上蚀积情况不同。0.5 m×0.5 m 障格内,4 个方向上断面最低点均在原沙面以上,说明此规格障格内主要发生堆积;1 m×1 m障格内 E-W 和 N-S 方向断面最低点在原沙面以上,NW-SE 和 NE-SW 方向断面有部分在原沙面以下,说明该规格沙障内仍以堆积为主;1.5 m×1.5 m 障格内除 N-S 方向,其他 3 个方向上断面均有部分在原沙面以下,障格内堆积与风蚀并存;2 m×2 m 障格内,4 个方向上断面大部分在原沙面以下,障格内以风蚀为主。

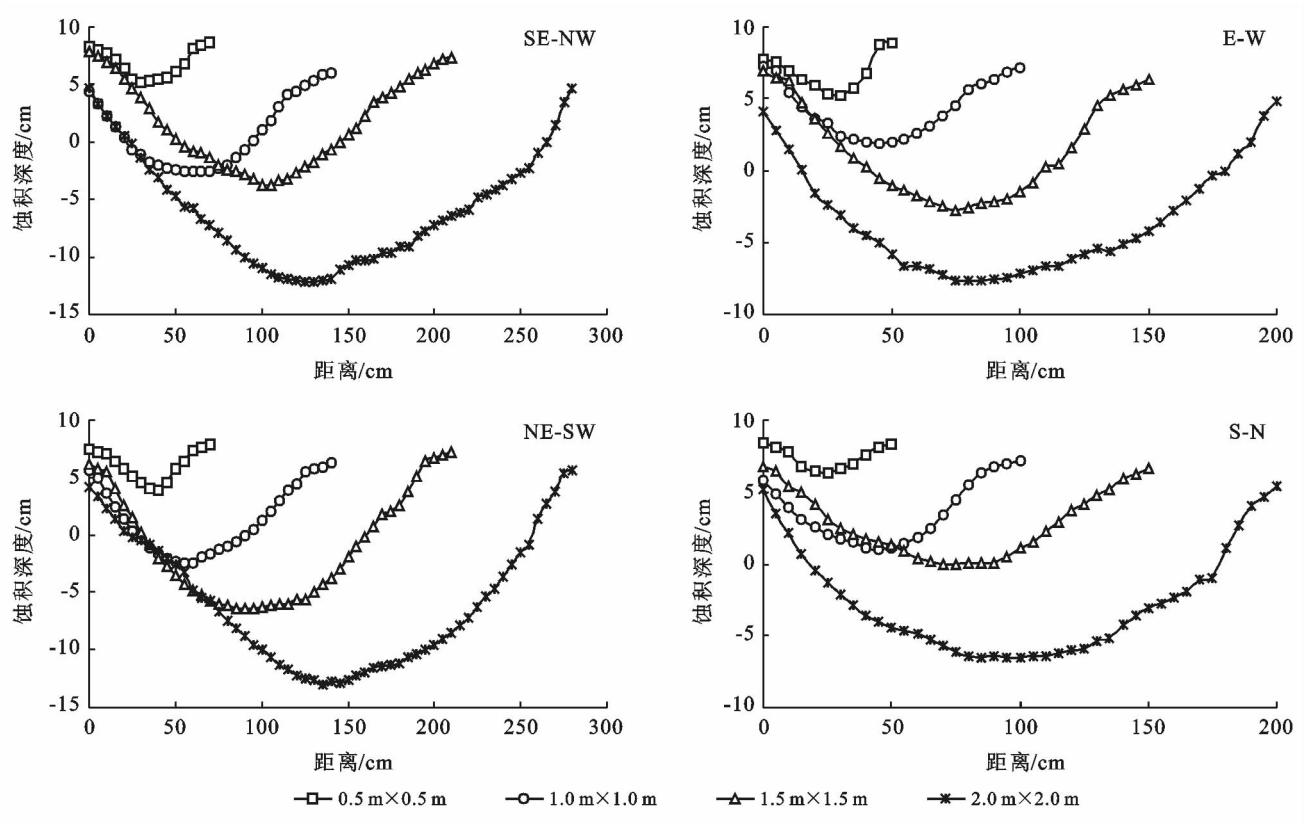



**图 2　障格内不同方位蚀积深度状况**

对 4 种规格沙障障格内不同方向断面轮廓线进行函数拟合,可为沙障凹曲面形态提供简明的描述方法,拟合结果如表 2 所示。

**表 2　障格内不同方向断面轮廓线拟合**

| 规 格 | 方 位 | 拟合方程 | $R^2$ |
|---|---|---|---|
| 0.5 m×0.5 m | NE-SW | $Y=0.002\,7X^2-0.197X+8.15$ | 0.85 |
| | W-E | $Y=0.005\,0X^2-0.235X+8.35$ | 0.86 |
| | NW-SE | $Y=0.002\,8X^2-0.190X+8.78$ | 0.89 |
| | N-S | $Y=0.003\,3X^2-0.165X+8.67$ | 0.89 |
| 1 m×1 m | NE-SW | $Y=0.001\,7X^2-0.215X+5.04$ | 0.93 |
| | W-E | $Y=0.002\,2X^2-0.208X+7.17$ | 0.93 |
| | NW-SE | $Y=0.001\,6X^2-0.197X+8.70$ | 0.94 |
| | N-S | $Y=0.002\,2X^2-0.189X+5.51$ | 0.93 |
| 1.5 m×1.5 m | NE-SW | $Y=0.001\,3X^2-0.258X+6.64$ | 0.97 |
| | W-E | $Y=0.001\,8X^2-0.271X+8.01$ | 0.97 |
| | NW-SE | $Y=0.001\,1X^2-0.218X+8.70$ | 0.95 |
| | N-S | $Y=0.001\,3X^2-0.186X+7.12$ | 0.98 |
| 2 m×2 m | NE-SW | $Y=9.084\,4X^2-0.258X+6.32$ | 0.97 |
| | W-E | $Y=0.001\,2X^2-0.219X+2.87$ | 0.98 |
| | NW-SE | $Y=7.911\,3X^2-0.221X+4.26$ | 0.98 |
| | N-S | $Y=0.001\,2X^2-0.223X+4.04$ | 0.98 |

由表 2 可知 4 种规格 PLA 沙障障格内 4 个方位垂直剖面轮廓曲线均符合二项式函数。拟合系数均在 0.8 以上,拟合度较高,说明障格内形成的凹曲面较为光滑,障格内沟壑坑洼等较少。表 2 中方程中二次项系数和一次向系数分别为 $a$ 和 $b$,$a$ 为垂直剖面轮廓曲线开口大小,系数 a 的值在 0.000 8～0.005 2 范围内变化,其数值随障格规格的增大逐渐减小,在不同方向上其数值由大到小依次为:E-W 和 S-N＞NE-SW 和 NW-SE。－b/2a 代表拟合曲线中心在方位线上的位置。经计算,0.5 m×0.5 m 障格内 4 条拟合曲线中点均在障格中心处附近,因此凹曲面中心基本与方格中心重合;1 m×1 m 障格内,凹曲面中心较方格中心向 SE 方向偏离;1.5 m×1.5 m 障格内,凹曲面中心较方格中心向 SE 方向偏离;2 m×2 m 障格内,凹曲面中心较方格中心向 S 方向偏离。

## 3　讨 论

风沙流经过沙障后,由于气流的涡旋作用,使障格内原始沙面充分蚀积后达到平衡状态,即形成稳定的凹曲面。一般认为,格状沙障满足蚀积系数在1/10～1/8 之间才能在障格内形成稳定的凹曲面,且这种比例关系是稳定的,不会随意增大或减小[14,29]。本研究计算的蚀积系数均在上述研究结果范围内,表明 0.5 m×0.5 m,1 m×1 m,1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m规格的 PLA 沙障内已形成稳定的凹曲面。本研究发现,随着 PLA 沙障规格的增大,障格内凹曲面中心风蚀深度和风蚀强度也呈现增大趋势,与张登山

等[16]研究结果一致,其中各指标数值大小有所差异,其原因可能是由于风力条件、沙物质属性、沙障材料不同等原因所致。

沙障障格内凹曲面的形成主要受控于地表气流运行速度、方向及地形等因素。障格内不同部位风蚀和堆积的分布还受到障体的作用,一般而言,障格中心距离障体最远,风力较强,易被侵蚀;而障格四周由于障体对气流的扰动,使流体以湍流形式运动,流速降低,促进沙粒沉降,多形成堆积现象。障格内蚀积分布的不同最终使其内部形成四周高、中央低的凹曲面[14,17,23]。研究区内 PLA 方格沙障凹曲面的形成过程主要受控于当地风向风速条件,在不同风向作用下,障格内 4 条断面轮廓曲线均符合二项式函数,障格内所形成的凹曲面较为光滑。且本文得出障格内 N-S 方向曲线开口均较小,W-E 方向轮廓曲线开口较大,这主要是受控于沙垄走向和研究区主害风方向,对 N-S 方向侵蚀较为严重,研究结果与袁立敏[24]等人研究结果一致。

根据凹曲面内蚀积体积变化,0.5 m×0.5 m 和 1 m×1 m障格内以沙粒堆积为主,拦截风沙流效率较高,可有效控制地表风蚀。1.5 m×1.5 m 障格内风蚀强度与堆积强度差值较小,障内大致保持蚀积平衡。2 m×2 m 障格内风蚀强度大于其他 3 种规格,但根据同一研究区沙垄上铺设 8 a 后的 PLA 沙障来看[26],2 m×2 m PLA 障格在铺设 8 a 后仍可维持原有形状(图 3),表明 2 m×2 m 规格 PLA 沙障内刚铺设后虽会发生风蚀,但在形成稳定的凹曲面后,沙面将不再继续向下风蚀,可长期发挥其固沙功能。



**图 3 PLA 沙障铺设 8 a 后效果(2016,丁延龙)**

在实际使用过程中,沙障铺设成本是必须考虑的因素,较小规格的沙障防护效益好,但其铺设成本亦十分高昂[9],因此在进行沙障施工设计时,要因地制宜,在风沙流活动强烈或需要重点隔离保护的区域,适用小规格沙障;在风沙活动较弱、防护需求不强的地区,适用较大规格的沙障。同时,对于某一地区设置什么规格沙障较好,还需根据当地风向、地形起伏等特点合理配置,才能使沙障的综合防护效果发挥到最佳。

## 4 结 论

(1) PLA 沙障障格内蚀积形态均呈四周高中间低的整体格局,随沙障规格的增大,凹曲面中心风蚀深度越深,最深可达 13 cm。障格四周呈堆积状态,堆积平均高度 6.29 cm。障格内凹曲面深度约为障格边长的 1/10~1/8,均形成了稳定的凹曲面。PLA 沙障障格内断面轮廓线基本符合二项式模型,平行主害风向的断面轮廓线深度较大,风蚀强度较高。

(2) 0.5 m×0.5 m,1 m×1 m,1.5 m×1.5 m 和 2 m×2 m 这 4 种规格 PLA 沙障障格内的净堆积强度分别为 17.29,7.09,0.61,8.2 g/cm$^2$。在障格内稳定的凹曲面形成过程中,0.5 m×0.5 m 和 1 m×1 m 障格内呈积沙状态,拦截风沙流效率高;1.5 m×1.5 m 障格内沙物质呈近乎积蚀平衡状态;2 m×2 m 障格内沙物质布设初期有所风蚀,但之后可形成稳定的凹曲面,仍有控制地表风蚀的作用。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 王涛,朱震达. 我国沙漠化研究的若干问题(1):沙漠化的概念及其内涵[J]. 中国沙漠,2003,23(3):209-214.

[2] 董光荣,吴波,慈龙骏,等. 我国荒漠化现状、成因与防治对策[J]. 中国沙漠,1999,19(4):22-36.

[3] 高冠龙,张小由,杨凯,等. 沙漠地区高速公路防沙效应试验研究:以营双高速公路八步沙段为例[J]. 水土保持通报,2017,37(2):17-20,26.

[4] 谭立海,马鹿,安志山,等.青海省共和盆地光伏发电基地风沙灾害现状、成因及其防治措施[J].水土保持通报,2017,37(3):182-187.

[5] 梁柯鑫,王起才,崔晓宁,等.格库铁路不同固沙措施的防护效益[J].水土保持通报,2018,38(5):300-306.

[6] 马瑞,赵锦梅,马彦军,等.沙障对不同林龄雨养梭梭林冠下浅层土壤含水量的影响[J].水土保持通报,2016,36(4):138-142.

[7] 张帅,丁国栋,高广磊,等.不同年限的草方格沙障对生态恢复的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(5):10-15.

[8] Li Xinrong, Xiao Honglang, He Mingzhu, et al. Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions[J]. Ecological Engineering,2006,28(2):149-157.

[9] 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):111-116.

[10] 孙涛,刘虎俊,朱国庆,等.3 种机械沙障防风固沙功能的时效性[J].水土保持学报,2012,26(4):12-16,22.

[11] 韩致文,王涛,董治宝,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.

[12] 马学喜,王海峰,李生宇,等.两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比[J].水土保持通报,2015,35(3):344-349.

[13] Murai H, Al-Afifi M A, Haffar I, et al. Use of date-fronds mat fence as a barrier for wind erosion control. Effect of barrier density on sand movement stabilization [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1990,32(3):273-282.

[14] 屈建军,凌裕泉,俎瑞平,等.半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J].中国沙漠,2005,25(3):329-335.

[15] 李锦荣.沙袋沙障的防风固沙效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.

[16] 张登山,吴汪洋,田丽慧,等.青海湖沙地麦草方格沙障的蚀积效应与规格选取[J].地理科学,2014,34(5):627-634.

[17] 周娜,张春来,田金鹭,等.半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J].地理研究,2014,33(11):2145-2156.

[18] 申景昕.2 种沙障对流沙生境与植被恢复的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2018.

[19] 原伟杰,虞毅,王戈,等.可降解聚乳酸沙障降解性能研究[J].水土保持通报,2012,32(3):107-110.

[20] 李谦.PLA 沙障防风固沙效益的变化过程[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[21] 周丹丹.生物可降解聚乳酸(PLA)材料在防沙治沙中的应用研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 周丹丹.沙袋沙障凹曲面特性研究[J].水土保持通报,2009,29(4):22-25.

[25] 袁立敏.PLA 沙障对土壤物理性质影响及其防护效益研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[26] 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.

[27] 袁立敏,高永,汪季,等.沙袋沙障对流动沙丘地表风沙及植被恢复的影响[J].水土保持通报,2014,34(1):46-50.

[28] 闫敏,左合君,董智,等.锡林浩特草原小叶锦鸡儿灌丛的阻雪能力及其对积雪形态的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):483-491.

[29] 朱震达,赵兴梁,凌裕泉,等.治沙工程学[M].北京:中国环境科学出版社,1995.138-149.