两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比

马学喜[1,2], 王海峰[1], 李生宇[1], 康向光[1], 孙 娜[1,2]

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: [目的] 在塔克拉玛干沙漠油田公路机械防沙展示区,对比两种固沙技术的固沙效益及其地形适应性,为工程防沙的优化设计及其应用提供理论依据。[方法] 对地形起伏条件下芦苇方格和尼龙网方格沙障的风沙危害状况进行了野外调查。[结果] 在固沙方格沙障设置初期,各种地形条件下芦苇方格沙障的沙害类型相对单一,均为半埋危害。尼龙网方格沙障的沙害类型多样,而且在沙丘纵断面上变化很大,在迎风坡和落沙坡风蚀危害发生比例大;在调查区内,尼龙网方格沙障 4 种沙害类型均有发生,发生的比例依次为:半埋>风蚀>全埋>压埋。两种方格沙障防护效益的差异与地形引起强烈风动力空间分异、自身布设方法和孔隙度有关。[结论] 草方格地形适应性强,在不同起伏的地貌区均有显著的固沙效果,而尼龙网方格沙障更适宜布设在较平坦的地貌区,而不适于地形起伏较大的地貌区。

关键词: 尼龙网方格; 芦苇方格; 风沙危害; 蚀积变化

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2015)02-0344-06 **中图分类号**: S157.1, X171.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.066

Comparison of Sand-protecting Efficiency and Terrain Adapted of Two Checkerboard Barriers

MA Xuexi[1,2], WANG Haifeng[1], LI Shengyu[1], KANG Xiangguang[1], SUN Na

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang* 830011, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: [Objective] To compare the sand preventing effects and terrain adaption of two different sand-barriers at sandy-prevention exhibition zone of the Taklimakan Desert petroleum highway in the Taklimakan Desert, in order to provide theoretical basis for application and structure optimization with sand control engineering. [Methods] The effect of reed checkerboard and nylon net checkerboard barrier on blown sand disaster in rugged terrain areas were investigated. [Results] The types of blown sand disaster during the early days of reed checkerboard barrier on the flat land and rugged terrain were relatively single and all semi-buried. The types of blown sand disaster with nylon net checkerboard barrier on the dune were diverse and varied greatly among different sites. The proportion of wind erosion was large in the windward and leeward slope. The sequence of blown sand disasters types with nylon net checkerboard barrier was the semi-buried, wind erosion, buried and deeply buried in the investigation areas. The protective effect of two checkerboard barriers on different sites was mainly caused by strong disturbance to the near ground surface wind field and wind speed from dune landform and the setting mode and the porosity. [Conclusion] The reed checkerboard fit different landforms. Sand-stabilizing project with nylon net checkerboard barrier is more suitable for flat sandy land than sites with rugged terrain in terms of controlling blown sand disasters.

Keywords: nylon net checkerboard; reed checkerboard; blown sand disasters; sand surface change

荒漠化威胁着全球资源环境和人类社会可持续发展,是全球重大环境问题之一,已受到广泛关注[1]。为了防治荒漠化的扩展,世界各地发展了形式多样的防沙工程,包括物理、化学、生物 3 种防沙技术[2]。机械防沙措施具有见效快,不需水源,较耐沙埋等优点,特别适用于无灌溉条件的流动沙丘地区,在工程防沙

收稿日期:2014-05-04 **修回日期**:2014-05-11

资助项目:新疆维吾尔自治区科技支疆项目"新型 HDPE 防沙网及配套安装组件研发与应用"(201291106)

第一作者:马学喜(1987—),男(汉族),甘肃省环县人,硕士研究生,主要研究风沙灾害治理与荒漠化防治。E-mail:maxx1207dc@163.com。

通信作者:李生宇(1975—),男(汉族),河北省宣化县人,博士,副研究员,主要研究风沙地貌与风沙灾害治理。E-mail:lishy_bb@163.com。

中得到了广泛应用。根据制作材料，将机械防沙材料分为 3 类：传统生物质材料（作物秸秆为主）、矿物质材料（黏土和砾石为主）和新型材料（以石油化工产品为原料或以农作物经发酵生成产品为原料[3]）。草方格作为常用的传统防沙材料，材料丰富廉价，且防沙效果明显[4-7]。尼龙网沙障作为一种新型的防护材料，具有造价相对低廉，抗老化，抗风沙，且可工业化生产，施工快速等优点[8]，特别是在一些风沙灾害比较严重的地区，尼龙网防护能快速达到立竿见影的效果。

学者们已从不同角度对草方格和尼龙网方格沙障做了较多研究[9-14]，但多针对某一种材料，而且地形条件相对平坦。然而两种固沙材料对较大起伏地形的适应性是否存在差异？至今相关研究报道鲜有报道。

2008 年 9 月，对布设于塔克拉玛干沙漠石油公路 K297 km 处的机械防沙展示区的尼龙网方格沙障与芦苇草方格沙障的风沙危害状况进行系统调查和综合分析评价，比较两者的沙害类型、防护效益以及地形适应性。以期为防沙工程的优化设计及其应用提供借鉴和理论依据。

1　研究区概况

塔克拉玛干沙漠石油公路南北纵贯塔克拉玛干沙漠，是世界上第一条长距离穿越流动性沙漠的等级公路。塔克拉玛干沙漠自然环境极其恶劣，风沙危害是公路安全运行的最大威胁。基于塔克拉玛干沙漠石油公路风沙危害防治的大量研究工作[15-18]，形成了一套适合于流动沙漠公路的沙害防治技术，为公路长期保持畅通提供了有力技术保障。1995 年建成以来，一直采用机械防沙，2006 年更新为植物防沙，防护效果显著，保障了公路交通安全运行，其成功的防沙工程建设受到国内外的广泛关注[19-21]。

本文研究区位于塔克拉玛干沙漠油田公路 K297 km处，深入塔克拉玛干沙漠腹地。根据巴音郭楞蒙古自治州且末县塔中气象站资料，该区起沙风频繁，年起沙风向以 ENE，NE，NNE，E 的风向组合为主，ENE 方向风时长、强度大，4—8 月为风季；研究区横跨一条高大复合纵向沙垄，主要走向 N50°E～N60°E，相对高程大于 80 m，高大复合沙垄上分布着形态各异的次级沙丘，垄间地宽 1～3 km，分布有沙丘链、新月形沙丘和小沙垄等[22]；地表沙物质疏松，以细砂和极细砂为主。因此，该区风力强劲，沙源丰富，为风沙危害的形成提供了风动力条件和沙物质基础。

2003 年在塔克拉玛干沙漠油田公路全线绿化工程中，该段有意没有绿化，而将其建成一个沙漠公路机械防沙工程建设技术展示区。该区防沙主要采用固沙工程措施，其中大部分采用芦苇方格沙障，其规格为 1 m×1 m，碾压芦苇秆出露地面 20 cm，埋入沙中 20 cm，疏透度约为 0.35；部分区域布设了尼龙网（黑色）方格沙障，规格亦为 1 m×1 m，尼龙网方格沙障高 20 cm，疏透度约 0.6，方格四角由插入沙中的 4 根长度约 40 cm 的固定桩来固定。

2　试验设计

2008 年 9 月，在研究区内选择纵向高大复合纵向沙垄与垄间平地过渡区，选取布设两种方格沙障的沙丘起伏地，设置了南北长 100 m，东西宽 55 m 的调查区，调查区总面积为 5 262.97 m^2，其中芦苇草方格沙障面积为 1 797.47 m^2，占 34.15%，尼龙网方格沙障面积为 3 465.5 m^2，占 65.85%。

通过调查，对两种方格沙障的风沙危害类型进行了划分，主要划分为风蚀、压埋、全埋、半埋等 4 种类型。风蚀危害是指风力对方格内沙面产生强烈风蚀和掏蚀，使沙障的外露高度大于 20 cm，沙障固沙能力极大降低，其进一步可演变为破坏；全埋是指方格内大量积沙，使沙障的外露高度在 0～5 cm，固沙能力较微弱；半埋是方格内有少量的积沙，沙障外露高度尚有 5～15 cm，仍有较大的固沙能力；压埋则是大量风积沙掩埋沙障形成的危害，沙障外露高度小于 0 cm，导致沙障防护功能基本丧失。

在芦苇草方格沙障和尼龙网方格沙障固沙区，分别选择一个次级新月形沙丘，从其迎风坡脚至落沙坡脚设置一条纵断面，用地质罗盘和皮尺分别测量断面各处的坡度和坡长，并统计断面上各种沙害类型的发生位置和长度。将调查断面数据输入 AutoCAD6.0，绘制断面上沙丘沿纵断面上风沙危害类型分布图。

用全站仪精确测量调查区域的地形，并划出不同风沙危害类型的分布范围，将测量数据输入计算机，用 CASS 7.0 制图，计算不同风沙危害所发生面积。经实地调查发现，调查区域的草方格沙障均为半埋危害，尼龙网方格沙障沙害类型多样，不同部位的危害程度不一样，因而特意针对尼龙网方格内的微地形进行了测量。分别选取沙丘背风坡严重风蚀、背风坡半埋危害和丘间平地半埋危害的沙障方格，以方格的中心点为原点 O，以相邻两边分别为 X 轴（N 方向）和 Y 轴（W 方向），分别选取方格 2 组对边的中点连线、2 条方格对角线共 4 条测线（呈“米”字形布局），设置 25 个测点，用塔尺和钢卷尺测量方格内沙面与尼龙网上沿的垂直距离，记录测点的直角坐标 x，y 和距离值 h。通过初始值（20 cm）减去距离值 h 计算沙面

蚀积强度，即现在沙面相对于沙障设置初沙面高度的变化值。将数据输入 Surfer 8.0，用克里格插值法进行空间插值，绘制方格沙障内积沙等值线图，并通过体积计算功能计算沙障的蚀积量。

3 结果与分析

3.1 研究区沙害类型的发生面积

如表 1 所示，在芦苇草方格沙障区，均为半埋危害，发生面积占 100%；在尼龙网方格沙障区，半埋、压埋、全埋、风蚀 4 种沙害类型均有发生，其中半埋所占面积最大，其次为风蚀，全埋和压埋的发生面积均较小。

在尼龙网方格沙障区沙害类型的具有一定的分布规律，全埋均分布于沙脊线前后约 1 m 的范围内；压埋危害主要分布于固沙区的迎风侧边缘；风蚀危害分布范围较广，有的分布于沙丘迎风坡脚、迎风坡中、落沙坡下部、沙丘两翼以及部分平沙地。

表 1 调查区沙害发生面积与比例

防护类型	沙害类型	面积/m^2	比例/%
尼龙网方格沙障	风蚀	727.73	21.00
	全埋	194.15	5.60
	压埋	55.63	1.61
	半埋	2 488.09	71.80
芦苇草方格沙障	半埋	1 797.47	100.00

3.2 沙丘纵断面上的沙害状况

调查发现，芦苇草方格沙障固沙区的风沙危害类型均为半埋危害，而尼龙网方格沙障固沙区除了半埋危害外，还有风蚀、压埋、全埋等类型。

在次级新月形沙丘上，芦苇草方格的固沙效果良好，受害程度较低，观测断面上背风坡和迎风坡的沙害类型均是半埋危害，芦苇秆外露高度尚有 5～15 cm，表明其受害程度较低，仍有较大的固沙能力。

而尼龙网方格沙障的固沙效果相对较差，受害程度较重，风蚀、全埋和半埋 3 种风沙灾害类型都有发生，其中风蚀比例最大，占 55.71%，主要分布于迎风坡坡中和背风坡下部；半埋其次，占 40.00%，主要分布于落沙坡上部和迎风坡上部；全埋最小，仅占 4.29%，分布于丘顶。沙丘两坡尼龙网沙障的风沙危害都以半埋和风蚀为主，其中沙丘背风坡半埋(57.14%)发生比例大于风蚀(39.29%)，而迎风坡风蚀(66.67%)发生比例大于半埋(28.57%)。

3.3 方格沙障内的微地形蚀积特征

图 1 为尼龙网方格设置 3 a 后不同地貌部位方格沙障内的地貌的微形态。在沙丘背风坡下部(图 1a)，尼龙网方格遭受严重风蚀，尤其在方格的主风向一侧掏蚀非常严重，深度大于 30 cm；相对于沙障设置初期沙面，方格内各点均呈净风蚀状态，风蚀量达到 0.097 m^3/m^2。在沙丘背风坡上部(图 1b)，尼龙网方格遭受半埋危害，方格内形成马鞍状的风沙堆积，其西北和东南北角形成轻微风蚀，部分尼龙网方格沙障下缘悬空于地表之上，而在西南和东北角的沙粒堆积已经与尼龙网方格沙障上缘平齐；相对于沙障设置初期沙面，方格呈净堆积状态，积沙量达到 0.101 m^3/m^2，风蚀微量。在地形较平坦区(图 1c)，尼龙网方格防沙效果良好，沙害类型均为半埋危害，沙障内沉积物基本呈一向西南倾斜的斜面，在迎主风向的东侧沉积量较多，相对于沙障设置初期沙面，方格呈净堆积状态，积沙量达到 0.025 m^3/m^2，风蚀量达到0.014 m^3/m^2，净堆积量达到 0.011 m^3/m^2。可见，在尼龙网方格设置初期，在地形较平坦区域和沙丘背风坡沙埋区，尼龙网沙障起到了较好固沙作用，而起伏较大的地貌部位易发生风蚀，防护效益较差。

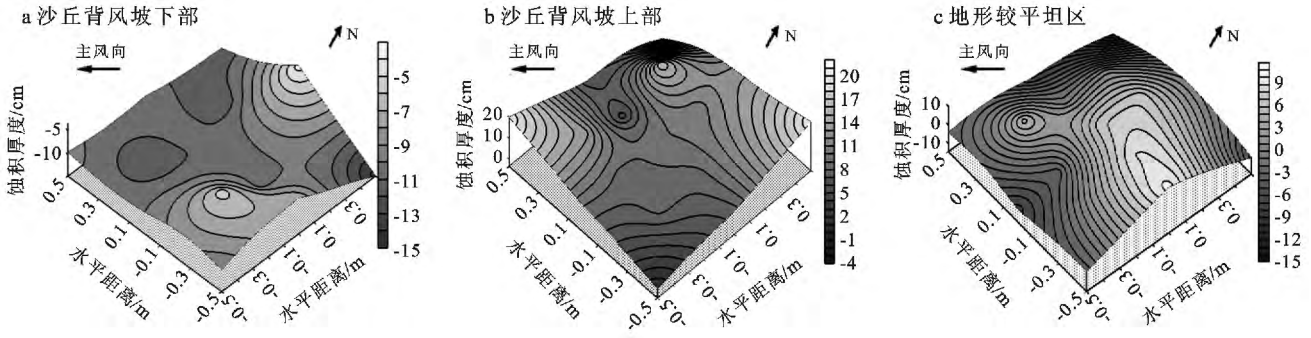


图 1 2008 年尼龙网方格沙障内微地貌特征

2013 年 9 月，对该区沙丘不同地貌部位保存较好的尼龙网方格内微地貌形态进行了测量，结果见图 2 所示。可见，在平沙地(图 2a)、迎风坡中(图 2b)、丘顶(图 2c)和落沙坡中(图 2d)四个地貌部位中，尼龙

网方格沙障均表现出较好的固沙效果，均呈净堆积状态，尤其在平沙地发育了较典型的凹曲面，积沙量分别为0.168，0.108，0.159，0.152 m^3/m^2，4 个地貌部位平均为 0.147 m^3/m^2，变差系数为 0.18。

同期观测的芦苇方格沙障内也呈净堆积状态，形成四周高中间低的凹曲面形态，丘间平地（图 2e）和迎风坡中（图 2f）的积沙体积分别为 0.179，0.152 m^3，两个地貌部位平均为 0.166 m^3。

可见，在地貌部位、设置时间相同的条件下，芦苇草方格的积沙量大于尼龙网方格沙障；在平沙地和沙丘迎风坡，尼龙网方格沙障积沙量分别是芦苇方格沙障的 93.86%和 71.05%。因而尼龙网方格沙障维护较好时，其具有较好的防护效益，平沙地的积沙量与芦苇方格较接近，而坡地差异较大。

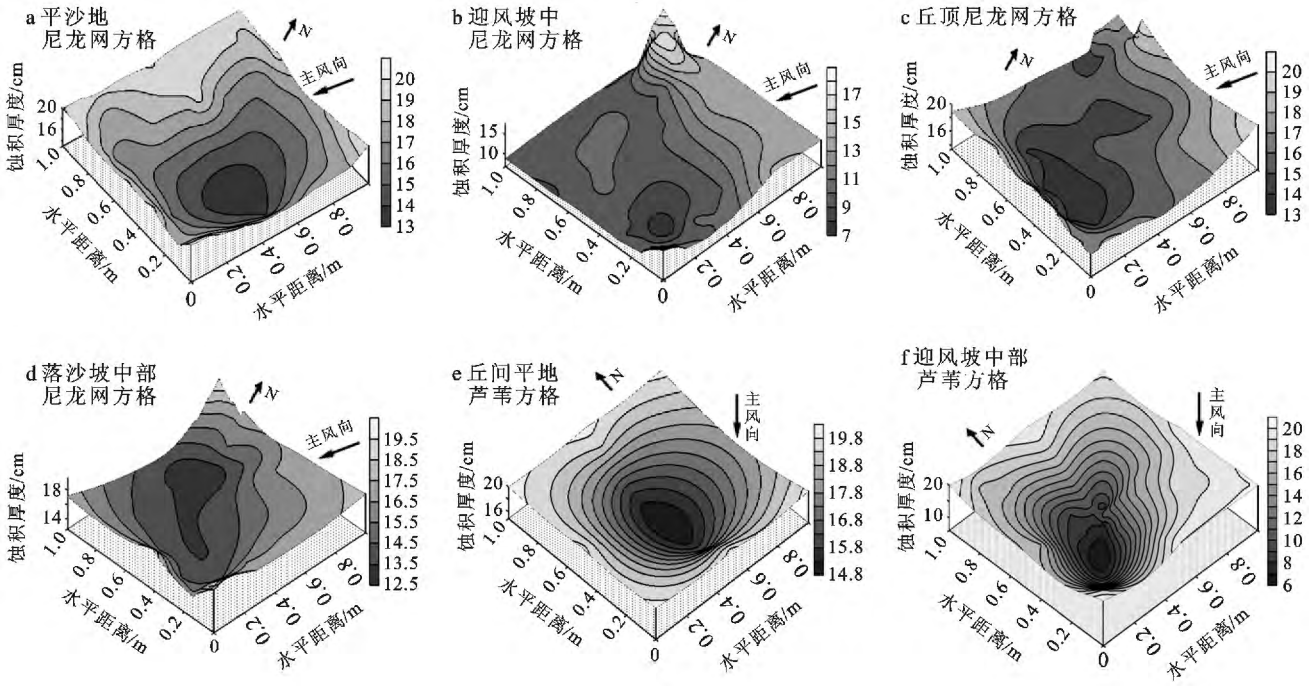


图 2　2013 年不同部位尼龙网方格和芦苇方格沙障内微地貌特征

3.4　方格沙障内断面蚀积特征

2 种方格沙障经过长时间的积沙，方格内的积沙凹曲面达到了稳定蚀积平衡状态，沙丘不同地貌部位纵断面如图 3 所示。草方格凹曲面趋于对称，积沙最低点位于方格中心位置，不同地貌部位最低点积沙高度存在着差异，平沙地最低点积沙高度最大值为13.9 cm，迎风坡中最小 9.8 cm，丘顶和落沙坡最低点的积沙高度分别为 10.2 cm 和 11.6 cm。尼龙网方格沙障最低点位置与草方格不同，最低点在纵断面 60 cm 处。尼龙网方格在沙丘不同地貌部位纵断面有差异，在迎风坡中趋于线性，其他部位为凹曲面，左右不对称。其最低点积沙高度还是平沙地比较大，与草方格相同。丘顶和落沙坡最低点的积沙高度分别为 12.1 和13.2 cm。

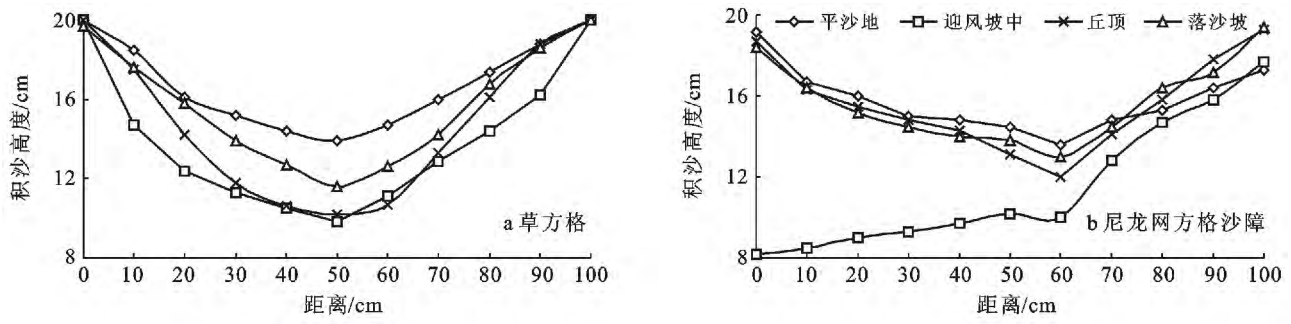


图 3　2013 年草方格和尼龙网方格沙障不同地貌部位纵断面蚀积特征

4 讨 论

4.1 防护效益与风动力空间分异的关系

在尼龙网方格沙障固沙区，地形起伏，虽然主要沙害类型是半埋，但风蚀、压埋、全埋等也占较大比例，三者合计 28.21%（表 1）；在沙丘纵断面上，不同地貌部位的沙害类型不同。可见，地形起伏区沙障风沙危害类型多样，并与地貌部位有显著空间耦合性，这种差异性分布源于沙丘地形扰动下流场和风速的空间分异。

沙丘是一种上凸的床面形态，对近地表气流运行形成很大障碍，迫使气流抬升和绕行，其中一部分气流在迎风坡被抬升，由迎风坡脚至丘顶气流逐渐加速，在沙丘顶部达到最大[23-24]；在背风坡空间约束骤然消失，气流发生扩散，附面层分离，形成大的气流涡旋，风速大幅降低；另一部气流沿沙丘边缘至两翼绕流，由于沙垄区次级新月形沙丘分布密集，相互连接成沙丘链，因而在两沙丘的侧向连接区（两翼）形成较闭塞的空间，绕流因空间压缩风速大幅增大。沙丘地形使近地表流场产生强烈扰动，形成了风速的显著空间分异格局：迎风坡加速区、落沙坡强烈减速区、两翼加速区。因此，沙丘迎风坡和两翼沙障的风蚀危害比例最高，而沙丘落沙坡半埋发生比例最高。

在沙丘迎风坡不同部位风速也有很大差异，坡脚气流减速，坡中部气流加速，接近沙丘顶部气流减速，因此 Wiggs 等[25]将沙丘迎风坡划分为坡脚－坡中侵蚀区和丘顶堆积区。

由于气流背风坡风速大幅度降低，由迎风坡搬运来的沙物质在落沙坡卸载堆积，并在重力作用下发生崩塌前移，因此风沙危害主要以压埋为主。从落沙坡脚至沙丘下风向 12 H（H 为沙丘高度，m）处，起沙风向与迎风坡风向近似于垂直，且主要作用于背风坡[22]，较大风速时也能引起风蚀发生。另外，反风向盛行时，气流直接作用沙丘落沙坡也能引起坡面风蚀。

4.2 防护效益与沙障布设方式的关系

在地形起伏相同的条件下，芦苇草方格沙障防护效果良好，沙害类型单一（半埋），而尼龙网方格沙障防护效果相对较差，沙害类型多样，尤其是风蚀危害严重。这主要与 2 种沙障的布设方式有关。芦苇方格沙障的材料为碾压芦苇杆，其具有一定强度和柔韧性，用平头锹插入沙土中即可直立，芦苇杆与下伏沙面形成了良好的固着结构。而尼龙网则柔软无法直立，必须依赖固定桩（长约 40 cm，埋入地下 20 cm 左右）的支撑才能直立悬挂于沙面上，气流可以从尼龙网与沙面之间的缝隙通过，同时伴随风吹尼龙网形变，缝隙扩大，沙面气流掏蚀使缝隙不断扩大，不仅防护效益下降，而且最终会影响固定桩的沙面稳定性。另外，芦苇方格沙障的各部位的芦苇杆之间相互独立性好，相互之间影响不大，而尼龙网方格沙障中的尼龙网和固定桩是不可分割的整体，一部分损坏尤其是固定桩倒伏必然牵连其他部分。因此这也是尼龙网方格沙障一旦局部损坏即快速蔓延的原因。

在地形平坦地貌部位（图 1c）尼龙网方格沙障防护效益最好，受灾最轻，积沙沉积于沙障中部，但由于尼龙网与沙面之间缝隙的吹蚀，仍沙障遭受一定强度的风蚀危害，其中北部木桩因风蚀而出露，埋深小于 10 cm，有潜在风蚀危害。但在地形起伏较大区域（图 1a），沙障防护效益微弱，严重掏蚀使固定桩埋深极小，极易风吹倒伏。

4.3 防护效益与沙障孔隙度的关系

孔隙度是影响沙障防护效益的最重要因素[26]，Ranga 等[27]研究表明沙障的阻力主要受孔隙度和高度的影响，Perera[28]通过研究发现当沙障孔隙度超过 30%时，沙障后的涡旋将会消失。沙障的孔隙度不仅直接影响沙颗粒的穿透能力，而且还改变气流的紊动特性，最终对沙障的防护效益产生至关重要的影响[12]。本试验区使用的尼龙网方格沙障是人工生产的一种以高密度聚乙烯（HDPE）为主要原料的尼龙网，孔隙度为 0.6，属于通透风型沙障，而该区布设的芦苇方格沙障孔隙度为 0.35，属于紧密型，因而对近地表气流影响作用不同[29]。两种方格沙障的防护效益差异，与沙障的孔隙度有关，导致方格沙障内的积沙形态和积沙量不同。

5 结 论

在地形条件相近的条件下，芦苇方格沙障和尼龙网方格沙障的风沙危害状况明显不同，前者危害程度较低，沙害类型单一，各地貌部位均为半埋危害，而后者危害程度很大，沙害类型多样，半埋、全埋、压埋和风蚀均有发生。在沙丘纵断面上，尼龙网方格沙障的沙害类型随地貌部位变化明显，风蚀发生比例最大，主要分布于沙丘落沙坡中、迎风坡下，半埋其次，主要分布于落沙坡上部和迎风坡上部，全埋很小，主要分布于丘顶。从整个防护体系来看，尼龙网方格沙障半埋危害发生面积最大，风蚀其次，全埋和压埋最小。在固沙方格内部积沙微形态和积沙量来看，两者也存在很大差异，芦苇方格内发育明显的凹曲面，而尼龙网方格积沙形态不规则，而且受地貌部位影响大。

两种材料的固沙方格沙障的防护效益和风沙危害之所以存在的差异，与地形引起强烈风动力空间分

异和自身布设方法和孔隙度有关，尼龙网方格与地面之间有空隙，易产生风蚀，并威胁固定桩和沙障的稳定性，尤其在地形起伏的条件下更易受损，而在平坦地形条件下较稳定，防护性能较好，防护效益接近芦苇方格。

可见，作为一种新兴的非生物固沙材料，尼龙网方格沙障更适宜布设在起伏度小的地貌区，而不适于起伏较大的地貌区；而传统的草方格对地形适应性强，防护效益好。因此，对于固沙工程来说，尤其是极端干旱沙漠地区，草方格仍是首选固沙方案。但尼龙网方格材料轻，运输成本小，可工业化生产，质量稳定，施工方便，适于重要防护对象的短期救急防护。因此地形起伏适应性差是尼龙网方格沙障的重要缺点，而布设模式和布设配件革新是解决该问题关键的切入点。

[参 考 文 献]

[1] 慈龙骏. 我国荒漠化发生机理与防治对策[J]. 第四纪研究，1998(2)：97-107.

[2] 韩致文，王涛，董治宝，等. 风沙危害防治的主要工程措施及其原理[J]. 地球科学进展，2004，23(1)：13-21.

[3] 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)：107-132.

[4] 蒙仲举，任晓萌，高永. 半隐蔽式沙柳沙障防风阻沙效益研究[J]. 水土保持通报，2014，34(3)：1-4.

[5] 王世杰，李生宇，徐新文. 阿拉尔—和田沙漠公路机械防沙体系内风沙沉积的粒度特征[J]. 干旱区资源与环境，2014，28(6)：130-135.

[6] 马瑞，王继和，屈建军，等. 不同结构类型棉秆沙障防风固沙效应研究[J]. 水土保持学报，2010，24(2)：48-51.

[7] 李生宇，雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用：以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例[J]. 干旱区研究，2003，20(1)：7-10.

[8] 屈建军，刘贤万，雷加强，等. 尼龙网栅栏防沙效应的风洞模拟研究[J]. 中国沙漠，2001，21(3)：276-280.

[9] 安志山，张克存，谭立海，等. 不同高度阻沙栅栏蚀积过程及防沙效益研究[J]. 水土保持通报，2011，31(6)：37-41.

[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)：12-22.

[11] 何志辉，李生宇，王海峰，等. 塔克拉玛干沙漠 4 种结构尼龙阻沙网的防风阻沙效益对比[J]. 干旱区研究，2014，31(2)：369-274.

[12] 张克存，俎瑞平，方海燕. 不同孔隙度尼龙网对风沙流减弱作用的风洞模拟[J]. 水土保持学报，2004，18(4)：4-11.

[13] 汪万福，王涛，樊锦诗，等. 敦煌莫高窟顶尼龙网栅栏防护效应研究[J]. 中国沙漠，2005，25(5)：640-649.

[14] 马瑞，刘虎俊，马彦军，等. 沙源供给条件对机械沙障固沙作用的影响[J]. 水土保持学报，2013，27(5)：105-114.

[15] 黄强，雷加强，王雪芹. 塔里木沙漠公路不同地貌部位的高立式沙障阻沙特征[J]. 干旱区地理，2000，23(3)：227-232.

[16] 雷加强，王雪芹，王德. 塔里木沙漠公路风沙危害形成研究[J]. 干旱区研究，2003，20(1)：1-6.

[17] 李生宇，雷加强，徐新文，等. 草方格固沙带对垄间新月形沙丘形态和移动的影响[J]. 干旱区地理，2005，29(5)：632-638.

[18] 王训明，陈广庭，韩致文，等. 塔里木沙漠公路沿线机械防沙体系效益分析[J]. 中国沙漠，1999，19(2)：120-127.

[19] Wang Xunming, Dong Zhibao, Chen Guangting, et al. On efficiency of sand-controlling system along the Tarim Desert Highway in the Taklimakan Desert[J]. Journal of Chinese Geography, 2000，10(2)：141-150.

[20] Lei Jiaqiang, Wang Xueqing, Wang De, et al. The blown sand disaster to the Tarim Desert Highway in Xinjiang, China[J]. Science in China(series D), 2002(45)：165-173.

[21] 韩致文，王涛，孙庆伟，等. 塔克拉玛干沙漠公路风沙危害与防治[J]. 地理学报，2003，58(2)：201-208.

[22] 李生宇，雷加强，徐新文，等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴特征：以塔中地区为例[J]. 自然灾害学报，2006，15(2)：14-19.

[23] 哈斯，董光荣，王贵勇. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面气流与坡面形态的关系[J]. 中国沙漠，1999，19(1)：1-4.

[24] 王训明，董治宝，赵爱国. 简单横向沙丘表面物质组成、气流分布及其在动力学过程中的意义[J]. 干旱区资源与环境，2004，18(4)：29-33.

[25] Wiggs G F S, Livingstone L, Warren A. The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence form field and wind tunnel measurements[J]. Geomorphology, 1996，17(1)：29-46.

[26] 凌裕泉，金炯，邹本功，等. 栅栏在防止前沿积沙中的作用：以沙坡头地区为例[J]. 中国沙漠，1984，3(4)：16-25.

[27] Ranga Raju K G, Garde R J, Singh S K, et al. Experimental study on characteristics of flow past porous fences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988，29(1)：155-163.

[28] 马全林，王继和，詹科杰，等. 塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景[J]. 水土保持学报，2005，19(1)：36-39.