

沙漠治理中的随机沙障铺设模型

宋世超¹, 梁 循^{1*}, 弭宝瞳², 关真宇¹, 王涵玉¹, 杨国涛³, 杨 丽³, 李 炜³

¹中国人民大学信息学院, 北京

²中国农业科学院农业资源研究所, 北京

³宁夏大学管理学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年4月23日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

本文介绍了一种针对沙漠治理的新型技术——随机沙障铺设模型。面对沙漠化带来的严峻挑战, 传统沙漠治理手段虽然有效, 但在效率和适应性方面常常受限。为此, 我们基于随机分布理论设计了随机沙障铺设模型, 旨在提高治沙效率和适应性。通过蒙特卡洛模拟和实地实验, 我们验证了随机沙障相较于传统方格型沙障在多种环境下的优越性, 尤其是在大面积沙漠地区。此外, 本文还详细描述了专用沙障铺设车辆的设计, 能够在复杂地形中高效铺设随机沙障。实验和分析结果均显示, 随机沙障铺设模型在提升治沙效率、降低成本、减少对水资源依赖等方面具有显著优势, 为沙漠治理领域提供了一种新的思路 and 工具。随着进一步研究和优化, 该模型有望在中国的巴丹吉林沙漠等地区内应用, 为应对沙漠化挑战、保护生态环境、促进可持续发展贡献力量。

关键词

沙障, 铺设模型, 随机分布, 沙障铺设车

A Random Sand Barrier Laying Model in Desert Governance

Shichao Song¹, Xun Liang^{1*}, Baotong Mi², Zhenyu Guan¹, Hanyu Wang¹, Guotao Yang³, Li Yang³, Wei Li³

¹School of Information, Renmin University of China, Beijing

²Institute of Agricultural Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing

³School of Management, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Received: Apr. 23rd, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 宋世超, 梁循, 弭宝瞳, 关真宇, 王涵玉, 杨国涛, 杨丽, 李炜. 文沙漠治理中的随机沙障铺设模型[J]. 交叉科学快报, 2025, 9(3): 357-370. DOI: 10.12677/isl.2025.93046

Abstract

In this paper, a new technology for desert control, the random sand barrier laying model, is proposed. Faced with the severe challenges brought by desertification, traditional desert management methods, though effective, are often limited in terms of efficiency and adaptability. Therefore, we have designed a random sand barrier laying model based on the theory of random distribution, aiming to improve the efficiency and adaptability of sand control. Through Monte Carlo simulation and field experiments, we have verified the superiority of random sand barriers over traditional grid sand barriers in various environments, especially in large desert areas. In addition, this paper also provides a detailed description of the design of specialized sand barrier laying vehicles, which can efficiently lay random sand barriers in complex terrains. The experimental and analytical results show that the random sand barrier laying model has significant advantages in improving sand control efficiency, reducing costs, and reducing dependence on water resources, providing a new approach and tool for desert governance. With further research and optimization, this model is expected to be widely applied in areas such as the Badain Jaran Desert in China, contributing to addressing desertification challenges, protecting the ecological environment, and promoting sustainable development.

Keywords

Sand Barrier, Laying Models, Random Distribution, Sand Barrier Laying Vehicle

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现如今,我国土地的退化和沙漠化不仅是环境保护的重要课题,更在多层次、多尺度的背景下对社会经济发展构成挑战[1]。我国沙漠化的情况严峻,据统计,中国的沙漠化土地面积 68.8 万平方公里左右[2],沙漠治理成为一个日益严峻的问题。在全球范围内,我国在沙漠化治理方面的努力和成果已经得到广泛认可。与此同时,中国的沙漠化治理技术和经验也逐渐被国际社会采纳,尤其是在大型沙漠化治理项目的规划和实施上,我国的先进技术和成功经验为很多发展中国家提供了宝贵的借鉴[2]。可以说,在沙漠化防治方面,我国已经取得了世界领先的成果,为全球环境保护做出了重要贡献。

沙漠化的危害不容小觑。首先,大量的农田被侵蚀,导致农业产量下降,影响国家粮食安全。其次,沙尘暴对人类居住区造成的伤害也是巨大的,除了对生命安全构成威胁外,沙尘暴还可能导致电力、通信等基础设施受损。此外,沙漠化进程对我国的交通网络,特别是公路和铁路造成了严重干扰。沙丘的移动可能阻断公路和铁路线,导致交通瘫痪,带来巨大的经济损失。最后,沙漠化还可能导致地下水位下降,河流干涸,影响人类和动植物的生存[3]。

沙漠主要是指土地表面完全或部分被沙覆盖,植物非常稀少,雨水严重缺乏,小环境空气相对比较干燥的荒芜地区。沙漠成因可以分为多种类型,热带沙漠主要受到信风(即贸易风)是从副热带高压笼罩,抑止区域内对流,导致降雨极少。温带沙漠是因为远离海洋的内陆地区,海洋水蒸气难以到达,降水稀少,比如我国的新疆塔克拉玛干沙漠、内蒙古腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠。还有一类是由于过度开垦和过度放牧导致,主要由过去人为活动造成的,例如毛乌素沙漠,在北宋时还不是沙漠,这一类也称为

沙地。当然还有很多特殊成因的沙漠。

前两类经常时而晴空，万里无云，又忽然风声大作，风力强劲，而且风向不定，有时最大风力可达蒲福风级 8 级，其沙丘可以随风移动。后一类的区域有一定降雨量，其风力没有前者大，沙丘一般不随风移动，沙丘稳定。然而，以塔克拉玛干沙漠、巴丹吉林沙漠等为代表的沙漠的动态沙丘，因其不断迁移特性，给治理工作带来了额外的挑战，该问题的复杂性、持久性、艰巨性及其对广泛空间和时间尺度的影响[4]，都远远超过了人们的想象。

本文以位于宁夏西部、甘肃北部、内蒙古中部的腾格里沙漠为例，提出一种沙漠治理的新模式及其相关模型和管理方法。

腾格里沙漠所面临的下列两个特定气象条件增加了治理的难度。首先，腾格里沙漠所经历的高风速，甚至可以达到每秒 20 米(相当于 8 级风)以上[5]，是人们平常所说的“沙漠风”的代表之一。这种高速风形成的主要原因是沙漠地区干燥、空气稀薄，导致风力难以被阻挡。此外，受该沙漠复杂的地形和环境因素影响，其风向频繁变化，一天之内可能经历多次不同的风向。这种高速度、多变性的风对治理工作提出了额外的挑战。

针对这些情况，笔者在实地观察到，在腾格里沙漠附近的部分路段，在道路两侧及重要地段，铺有一定宽度的草方格。这一策略旨在稳定路面两侧的沙土，从而减少沙尘对驾驶安全的影响。不过，仍有部分地区的沙粒受风力影响已经飘移到了公路上。尽管在大多数情况下，这种沙尘沉积不足以对交通造成明显影响，但在路面上的微小沙粒也可能给驾驶带来潜在的安全风险，尤其是在高速行驶时。此外，沙漠的某些地区还出现了流动沙的现象，即沙粒在风的作用下持续地移动，对土地退化和交通安全均构成潜在威胁。

建国以后，我国在沙漠治理上做出了重大努力。1959 年 3 月，中国科学院成立治沙队，动员了近 800 名专家对主要沙漠进行综合考察。在随后的几年中，六大治沙综合试验站和二十个治沙中心站相继建立[6]，为沙漠化治理工作提供了科研和实践基地。这些站点成功应用了灌溉固沙、化学固沙等技术，为铁路和公路建设中的风沙防治提供了关键技术支持。随着研究的深入，我国的沙漠研究方向也转向了更为复杂的土地沙漠化问题，涉及更广泛的地理范围[7]。我国已在沙漠治理上取得的成果，为沙漠化治理奠定了坚实的基础。

草方格固沙技术是在一个特殊情形下出现并大范围推广使用的。在 20 世纪 50 年代前苏联专家土库曼科学院院士彼得洛夫在考察中国宁夏沙坡头地区时，在回国前夕，甘肃的一位同志向他提出这个问题，他晚走了几天，与中国专家一起，发明了草方格拦沙法[8]。在他的建议和指导下，麦草方格固沙技术在沙坡头被开始推广应用[8]。

随着治沙工作的深入，治沙方法日益丰富，各类治理方法得到了广泛的应用和验证。传统治沙方法主要包括植物固沙、化学固沙、工程治沙、草方格沙障等方法。

植物固沙[9]-[11]，主要通过种植草类或树木来固定沙土，形成植被覆盖，降低风速并减少风沙的侵蚀。该方法不仅有效地控制了沙丘的迁移，还为生态系统的恢复和维护创造了条件。灌丛等植物对降低风速、减少风蚀具有显著效益，对维持沙地生态平衡、防治沙漠化具有重要作用。目前，在沙漠中广泛采用的是梭梭树的种植防沙方法。梭梭树的特点是抗旱、抗热、抗寒、耐盐碱性等，而且喜光，不耐庇荫，适应性强，生长迅速，枝条稠密，根系发达，有利于固沙。幼苗成活率较高，但生长较慢，一般情况下种植前灌足底水。但缺点是需要水灌溉，地球上降水量不均匀，气候有差异，有森林就会有沙漠。治沙的目的不是非沙漠化，不是向沙漠要森林要良田，治沙的目的是不让沙漠进一步扩大化，是为了不把扬起的沙刮到人类居住的区域，影响人类生活。所以没有必要在沙漠里大量种树，而只需要适当设置沙障，挡住大规模沙子，不使之进入类主要生活区域(当然包括沙漠中修的公路和高铁)就行。沙漠如同森林

一样,给地球的地表增加了多样化的地貌,丰富了人类(旅游)生活的乐趣。

化学固沙[12]也是沙漠化治理中的一种重要手段,主要通过化学物质的施用来改善沙土的物理性质,增加土壤的凝聚性,从而减少风沙的发生和沙漠化的进程。

太阳能光伏治沙是近几年发展起来的一种模式,其最大的特点是把发展光伏和沙漠治理相结合,光伏治沙还避免了因沙漠植树消耗的大量农业用水。我国沙漠地区通常气候干燥,降雨量极少,日光直接照射的时间很长,有着丰富的太阳能资源。

工程治沙[13][14]利用拦沙网等设施来阻挡和减少沙的流动。与植物治沙相比,工程治沙往往能在短时间内取得显著的治沙效果,机械沙障在降低风速、减少风蚀、固定流动沙丘等方面也表现出显著效果。但同时也涉及更大的经济投入和后期维护。此外,拦沙网不可生物降解的特性对生态环境可能存在潜在不良影响。同时在遭受极端天气时,由于其规模铺设的特性,拦沙网的修复时间和成本均较高[14]。近期研究通过改良拦沙网的材料采用如 PLA (Poly Lactic Acid, 聚乳酸)等生物降解材料来替代这些人造合成材料,从而增加其环境友好性[15],此外,也存在使用 HDPE (High Density Polyethylene, 高密度聚乙烯)等高强度材料增强拦沙网使用寿命和机械强度[16][17]。在拦沙网材料选择上,传统合成材料如 HDPE 提供高强度和耐久性,但不可生物降解的特性可能对环境造成潜在长期影响。而生物降解材料如 PLA 则对生态更为友好,但可能在强度和耐久性上逊色。在后期维护上也比较简单,如果风吹走个别或少部分沙障后,如果面积较大需要补植,只需人工进入,修补或重置被风刮倒的沙障;如果采用 PLA 材料植成的方格,未来方便 PLA 网通常是连成一片的,风会吹走一片,“灾后重建”复杂。

草方格沙障[9][10]主要由生物降解材料或其他可持续材料构成,形成一个方格状的结构。当风沙流经这些方格时,风速会受到阻碍并显著减小,沙粒因此在方格内沉积。同时,方格内的植物得到生长的空间,其根系进一步稳定土壤,增强固沙效果。草方格沙障的局限性也表现在多个方面。首先,当风力增强,有序种植的草方格容易被风大规模吹散,这限制了其在风力较强或不稳定气候条件下的应用。其次,在进行机械化铺设时,草方格面临着适应多样化和复杂地形的挑战[18]。对不规则沙丘,草方格也难以完成整齐的人工铺设。如果使用大型的草方格铺设车,一般仍较大地受地形、地质松软程度的限制,而且同样也难以完成整齐的方格铺设。第三,草方格还存在易腐烂导致的使用寿命短、机械强度差等问题。这为新型沙漠化防治技术,尤其是在高效性和可持续性方面,提出了更高要求,提供了广阔的研究空间。近年来,有对草方格铺设材料进行改良的研究,以提高其耐久度[19],还有通过高度机械化的铺设过程以减少人工成本和提高施工效率的研究[18][20][21]。这些多角度、多层次的改良研究为新型的沙漠化防治技术提供了有益的理论支持和实践参考。

在治沙措施发展的过程中,拦沙网或草方格的铺设方式的实践尝试也更加多元。传统沙障可以铺设为同等高度的三角形、六边形、方格形甚至“A”字形[22]沙障(见图 1)。三角形障格可对过境气流扰动更大,尤其在高速环境中,有可能更为有效地降低地表风速[23],但在铺设难度和效率上可能逊于方格。A 形铺设的防沙网则在某些特定的地理和气候条件下展现出了较好的拦沙效果[22]。这些尝试都旨在找到一种经济高效的拦沙解决方案。

为了解决传统拦沙方法在适应性、成本和生态可持续性方面的局限,本文提出了一种新型的沙漠治理模型:随机沙障铺设模型(见图 2)。

随机沙障铺设方法有如下优点:首先,本文通过大量计算机仿真,发现随机铺设沙障的治沙效果,能够达到或超过传统的拦沙方法,例如拦沙网和草方格拦沙网的效果。其次,随机沙障铺设车具有高度的适应性和灵活性。与传统方法相比,随机沙障铺设车可以在多种不同的地形下工作,大幅度减少了人工成本和操作时间。在降低治沙总体成本的同时提高工作效率,从而在短时间内实现大规模的治沙工作。第三,与现有的 PLA 或 HDPE 方格拦沙网等方法相比,随机沙障具有更简便和高效的修复流程,每次修

复只需要替换破损的沙障，而采用 PLA 或 HDPE 方格沙障铺设方法，则需要修复成片的被风吹倒的沙障区域。

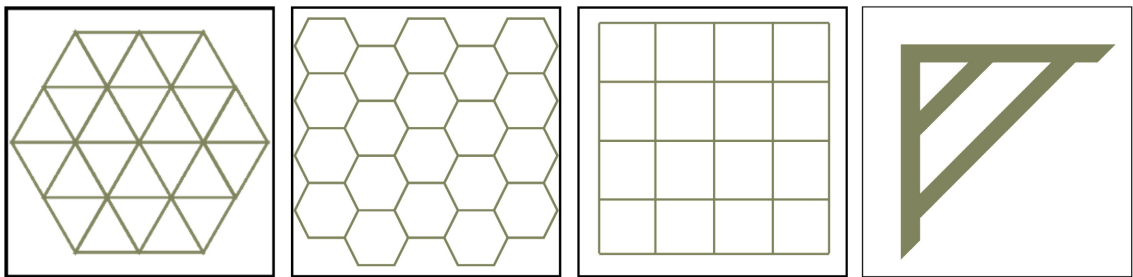


Figure 1. Schematic diagram of the traditional sand barrier laying method
图 1. 传统沙障铺设方式示意

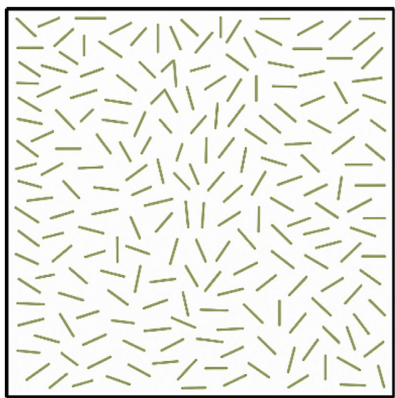


Figure 2. Randomized sand barrier laying method
图 2. 随机沙障铺设方式

过往研究主要通过实践应用比较防沙效果，同时也有部分研究通过构建数学模型[24]-[26]模拟风沙环境，从而测算不同防沙方法的效果。本文通过构建风沙模型并利用计算机模拟，量化评估随机沙障与传统拦沙方法在拦沙效率、机械性能以及长期稳定性方面的比较。这些评估不仅对于深化随机沙障在不同环境和条件下的适用性有关键意义，也为其在土地退化和沙漠化治理中的进一步应用提供了科学依据和方法支持。

本文的结构如下：首先，我们通过数学证明了随机沙障的治沙效果，证明其与方格沙障的拦沙效果相当甚至更为优越。接着，我们通过计算机仿真和实验验证了两者的效果。最后，本文进一步设计了随机沙障铺设车，该车由单人驾驶，能够在不规则的沙丘上行驶，并成功完成沙障的随机铺设操作。

2. 数学模型

我们从理论上分析了方格型沙障和随机型沙障的挡风效果。首先我们给出一些符号的规约，如表 1 所示。此外，为了方便表述，我们令沙场为一个平面直角坐标系，其左下角对应坐标系的原点 O 。为了理论分析不同沙障的挡风效果，我们令两种类型的沙场都为 $n \times n$ 大小，且均有 $2n(n-1)$ 个沙障以供铺设。

2.1. 方格型沙障交点数的上、下界，及数学期望

对于方格型沙障，其随机过风与沙障的交点数下界即 0，也即随机过风根本不穿过任何一个沙障。对于其上界，由于方格型沙障会存在共线现象，而共线的沙障不可能与过风产生超过一的交点数。对于 $n \times n$

的沙场，共有 $2(n-1)$ 个互不共线的沙障，因此随机型沙障只可能和这 $2(n-1)$ 个沙障组成的异质线条产生交点。当且仅当随机过风为 $l_{wind}: y = x$ ，则能保证交点数为 $2(n-1)$ 。

Table 1. Symbol statute

表 1. 符号规约

符号	含义
$n, n \in \mathbb{N}_0$	沙场边长
N	沙障数
$2n(n-1)$	$n \times n$ 沙场上的沙障数
$l_{wind}: y = kx + b$ 或 $l_{wind}: x = b$	随机过风
$l_{barrier}: y = kx + b, x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2$	沙障
$X_{grid}(n)$	$n \times n$ 沙场上方格型沙障交点数
$X_{random}(n)$	$n \times n$ 沙场上随机型沙障交点数
$EX_{grid}(n)$	$X_{grid}(n)$ 的数学期望
$EX_{random}(n)$	$X_{random}(n)$ 的数学期望

现在我们来计算方格型沙障交点数的数学期望。为了简化问题我们令过风与水平坐标轴恒有 45° 角，即 $l_{wind}: y = x + b$ ，此时， b 在从 0 到 n 的变化过程中(如图 3 所示)，其交点数从 $2n$ 均匀变化到 2。由于沙场具有轴对称性，我们只需要考虑左上部分即可。因此其数学期望为

$$EX_{grid}(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 2i = n + 1 \quad (1)$$

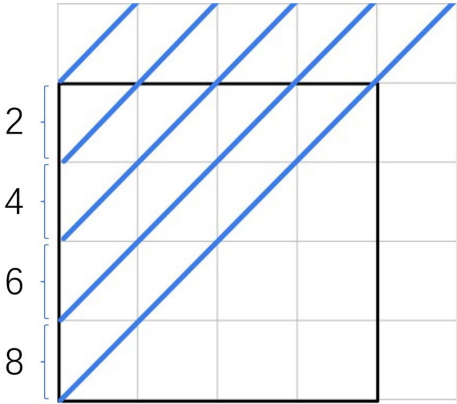


Figure 3. Number of intersections of square-shaped sand barriers on either side of a special crosswind demarcation (example for a 4×4 sand field)

图 3. 方格型沙障在特殊过风分界两侧的交点数量(以 4×4 沙场为例)

2.2. 随机型沙障交点数的上、下界，及数学期望

对于随机型沙障，其下界同样易知为 0。而对于其上界，只要令所有沙障和过风分别为，

$$l_{barrier}: y = \frac{i}{2n(n-1)}, 0 \leq x \leq 1, i = 1, 2, \dots, 2n(n-1) \quad (2)$$

$$l_{wind}: x = 0.5,$$

则能够让过风与所有沙障产生交点, 因此其上界为 $2n(n-1)$ 。值得注意的是, 遵循类似上述的构造方法, 可以有无数种令交点数达到上界的排布方式。这意味着, 随机型沙障能够在上界的表现上更加优秀。

现在我们来计算随机型沙障交点数的数学期望, 以下推证遵循在计算方格型沙障时的简化设置。在随机型沙障中, 沙障是任意散布在沙场中的, 因此只有当沙障落入①所在区域时, 沙障才会与过风有交点, 如图 4 所示。因此, 现在据古典概型, 使用面积法近似求解沙障落入区域①的概率,

$$p = \frac{S_{\textcircled{1}}}{S_{\textcircled{1}} + S_{\textcircled{2}}} = 1 - \frac{(n - \sqrt{2})^2}{n^2}$$

对于给定一半的区域, 我们有 $n(n-1)$ 个沙障以供安排, 因此最终的数学期望为

$$\begin{aligned} EX_{\text{random}}(n) &= N \times p \\ &= n(n-1) \times \left(1 - \frac{(n - \sqrt{2})^2}{n^2} \right) \\ &= \frac{2(n-1)(\sqrt{2}n-1)}{n} \end{aligned} \quad (3)$$

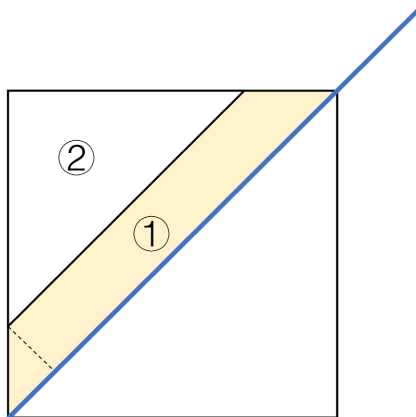


Figure 4. Randomized sand barriers with intersectable domains (①) and non-intersectable domains (②) at $l_{\text{wind}} : y = x$

图 4. 随机型沙障在 $l_{\text{wind}} : y = x$ 时的可相交域(①)与不可相交域(②)

2.3. 结论

从下界来看, 方格型和随机型水平相当; 从上界来看, 方格型为 $2(n-1)$, 随机型为 $2n(n-1)$ 。由于 n 是非负整数, 因此随机型沙障的上界总是不小于方格型沙障的上界。从数学期望来看, 我们可以将公式(1)和公式(2)绘制出来, 如图 5 所示。可以发现仅当 $n < 3$ 时, 方格型沙障交点数的数学期望才可能超过随机型沙障的交点数。综上所述, 尽管两种类型的铺设方式的挡风能力下限相同, 但随机型排布方式能够极大的提高其上限的表现能力, 同时具有更好的数学期望, 表明随机型沙障的优异性。

3. 仿真实验

为了验证所提出方法的合理性与有效性, 我们使用蒙特卡洛方法进行模拟实验。蒙特卡洛方法能够在计算机上进行基于概率统计的模拟实验, 从而替代耗时高, 成本大的实地测验。

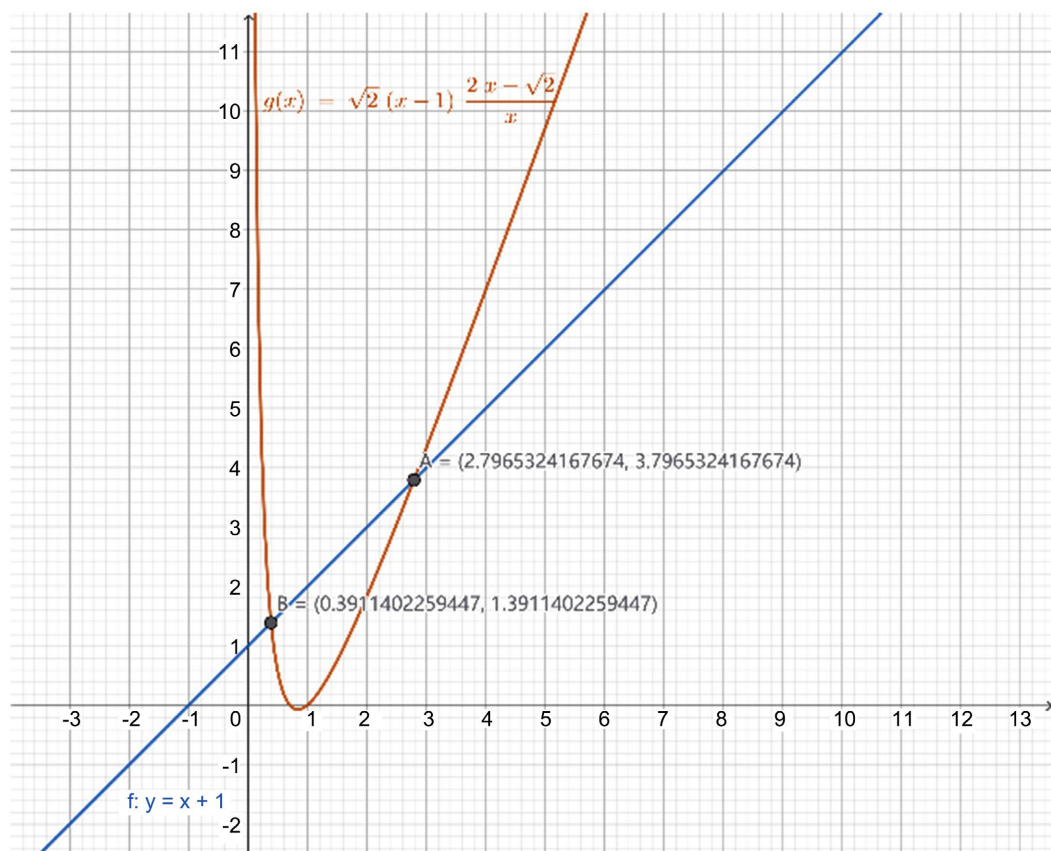


Figure 5. Mathematical expectation of square-shaped sand barriers and randomized sand barriers (in green and blue, respectively)

图 5. 方格型沙障和随机型沙障的数学期望(分别为绿色和蓝色)

我们的实验的核心目标是，同等情况下，对比不同沙障摆放方式下的防风能力，以对沙障模型的选择提供理论指导。为了合理简化问题建模，我们认为沙障即一条线段，沙漠过风即是一条两端无限延长的直线；过风与沙障的相交个数即沙障挡风的次数，因此，同等情况下，相交点越多防风固沙能力越好。

3.1. 实验设置

在此实验设计中，我们强调了确定性和可控性，以确保我们能够准确比较方格型沙障和随机型沙障的效能。这种方法有助于排除因非基本参数差异而引起的干扰，使我们更容易捕捉到两种不同沙障布局之间的实质性差异。

首先，我们需要明确基本尺寸标准。由于方格型沙障呈规则的布局，因此我们将方格型沙障的单元长度作为单位长度，定义为一单位方格长度。

其次，我们需要精确定义研究场地的尺寸。为了进行有效的对比试验，方格型沙障和随机型沙障将在相同大小的模拟沙场上进行模拟。图 6 展示了一个 5×5 大小的模拟沙场。除此之外，我们还在 3×3 、 10×10 、 20×20 等规格的沙场上进行了实验。

进一步，我们需要明确过风的次数。在给定模拟沙场的情况下，我们让两种铺设模型均在同样的过风次数下进行实验，观察二者挡风次数的差异。我们将其保持一致，即过风次数均设置为 30 次，以确保两种布局模型在相同的过风条件下进行比较。这样一来，我们可以更准确地测量它们在挡风效能上的差异，而不会受到风向变化的干扰。

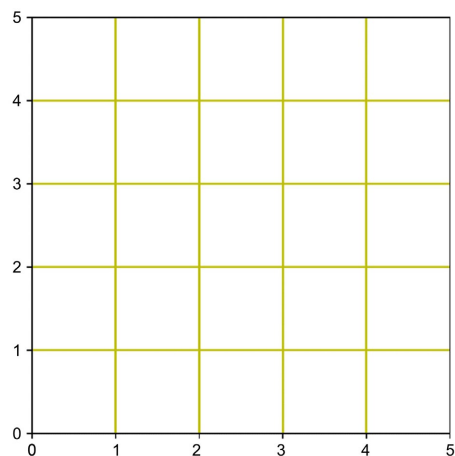


Figure 6. Simulated size of a 5×5 sand field (with the use of the box-shaped sand barriers)
图 6. 一个 5×5 大小的模拟沙场(使用方格型沙障铺设)

最后，我们必须确定沙障的数量参数。对于同一沙场，方格型沙障的数量是确定的，对随机型布局方式同样使用该数量，保证实验环境相同，以进行深入的实验研究，探讨不同布局对风沙流动的影响。

本研究的实验设计考虑了多个关键因素，以确保结果的准确性和实用性，为风沙控制和保护工程提供了有力的数据支持。

3.2. 对比模型

我们将提出的随机型沙障模型同传统的方格型沙障模型进行了对比。方格型沙障的布局规整，对任何过风的挡风效果稳定，但铺设成本高、难度大；而随机型沙障的布局更加任意，因而成本相对低，其挡风效果有其特殊性。随机型沙障在铺设时，我们假设了沙障之间不会发生“碰撞”，这是因为一个显然的事实，人们在进行铺设时，不希望在原来的沙障上重叠地进行铺设。在实验过程中，我们固定了两种沙障的布局如图 7 所示。

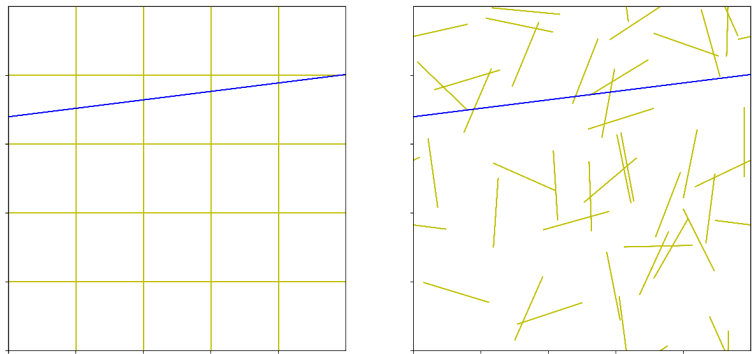


Figure 7. Schematic layout of the boxy and randomized sand barriers¹
图 7. 方格型沙障和随机型沙障的布局示意图

3.3. 实验环境

实验程序运行在拥有 8 块 Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU 的计算机上，蒙特卡洛模拟程序使用

¹ 我们使用单位方格长度作为模拟沙场(包括方格型沙障和随机型沙障)横纵坐标轴的度量单元。以下模拟实验如未指明，均采用该规范。

Python3.9.12 开始，并在带有 IPython 内核的 Jupyter Notebook 交互式编程环境中获得实验结果。这样的配置不仅保证了计算资源的充足，还提供了方便的编程和实验环境，有助于高效地完成实验任务并分析结果。

3.4. 实验分析

根据前一章的实验设计，我们进行了相应的对比实验。表 2 详细呈现了实验的结果，同时，图 8 作为一个实验案例呈现了实验过程。从结果来看，尽管使用相同数量的方格型沙障，随机型沙障表现出更优异的性能，在沙场大小超过 5×5 之后，总是能比方格型收获更多的交点，其比率最高能达到 1.14 左右。这意味着可以以更低的成本获得更出色的防风治沙效果。

Table 2. Comparison results of experiments with square and random sand barriers

表 2. 方格型沙障与随机型沙障实验对比结果

过风次数	沙场大小	沙障数	方格型交点数	随机型交点数	随机型/方格型
1000	3×3	12	2	1.94	0.970
1000	5×5	40	4	3.58	0.895
1000	10×10	180	9	9.43	1.048
1000	20×20	760	19	20.18	1.062
1000	40×40	3120	39	41.22	1.057
1000	80×80	12,640	79	84.2	1.066
1000	100×100	19,800	99	105.58	1.066
1000	200×200	79,600	199	211.35	1.062
1000	300×300	179,400	298.98	317.57	1.062
1000	400×400	319,200	398.99	423.51	1.061
1000	500×500	499,000	500	530.64	1.061
1000	600×600	718,800	599	635.73	1.061
1000	700×700	1,278,400	798.99	847.27	1.060
1000	1000×1000	1,998,000	998	1138.97	1.141
1000	1200×1200	2,877,600	1199	1373.01	1.145
1000	1400×1400	3,917,200	1399	1595.21	1.140

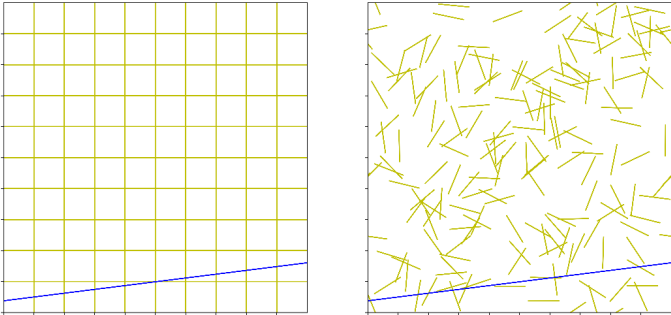


Figure 8. Example of an over-wind experiment under a 10×10 sand field. The left figure shows the square-type sand barriers, and the right figure shows the random-type sand barriers (where the number of sand barriers are 180, the number of square-type intersections is 10, and the number of random-type intersections is 8)

图 8. 10×10 沙场下的一次过风实验案例。左图为方格型沙障，右图为随机型沙障(其中，沙障数均 180 个，方格型交点数 10 个，随机型交点数 8 个)

然而，我们所提出的随机型沙障也存在着一一些局限性。相比较方格型沙障可以对任意方向任意位置

来风的平均挡风能力来说, 随机型沙障的挡风效果呈现更高的变异性。具体而言, 随机型沙障的挡风能力从边缘到中心逐渐递减。这对风沙流动的控制产生一定的不确定性。我们可以在图 9 中看到, 方格型沙障和随机型沙障的挡风能力(即交点数量)的频率分布存在显著的差异特征。

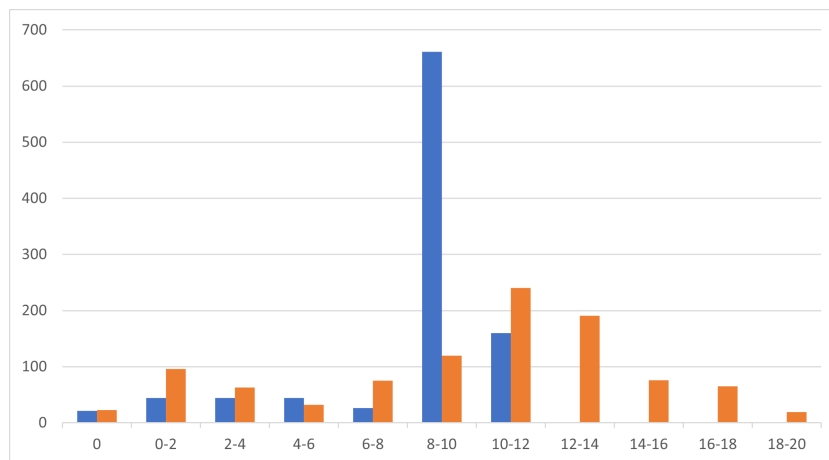


Figure 9. Frequency distribution of the number of times the wind is blocked by the square-type sand barriers (blue) and the random-type sand barriers (red) under the 1000 times of overwinding of a 10×10 sand field (where the horizontal axis represents the number of times the wind is blocked, and the vertical axis represents the frequency of the number of times the wind is blocked)

图 9. 10×10 沙场 1000 次过风下, 方格型沙障(蓝)和随机型沙障(红)的挡风次数的频数分布(其中, 横轴表示挡风次数, 纵轴表示挡风次数的频数)

为了缓解这一挡风效果变异性问题, 值得研究如何充分利用方格型和随机型沙障的优势, 以实现成本和效益的统一。一种可能的解决方法是采用大规模尺度的方格型沙障, 并在其内部内嵌随机型沙障, 从而融合了两种布局的特点。这种混合型沙障布局可能在减小挡风效果的不均匀性的同时, 保持了相对较低的成本, 是一个值得进一步研究和实验的方向。

4. 沙障车的设计

普通沙障车只能铺设三角形或正方形的草格, 为了解决传统拦沙方法在适应性、成本和生态可持续性方面的局限, 本文设计了一种防沙更加高效的随机沙障铺设车和配套的防沙网杆。

4.1. 防沙网杆设计

随机沙障铺设车具有高度的适应性和灵活性。与传统方法相比, 随机沙障铺设车可以在多种不同的地形下工作, 大幅度减少了人工成本和操作时间。在降低治沙总体成本的同时提高工作效率, 从而在短时间内实现大规模的治沙工作。首先我们自行设计了防沙网杆, 其尺寸和形状如图 10 所示。杆长约 120 cm, 防沙网长 100 cm、宽 20 cm。将防沙网杆插入沙土后可有效的延缓沙土流失。

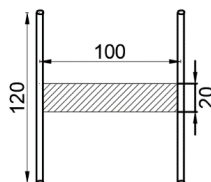


Figure 10. Schematic diagram of the anti-sand mesh poles (Unit: cm)

图 10. 防沙网杆示意图(单位: cm)

4.2. 防沙网杆下压机构设计

根据特别设计的防沙网杆，我们设计定制了特定的下压机构来保证防沙网能够稳固插入沙土之中，原理如图 11 所示。首先在长杆的一头我们设计了一个锤头来提供足够的下压力量。电动机带动曲轴一直旋转，下压长杆的一端，使垂头抬起，当曲轴凸起的一端转至最低点，长杆被彻底释放，在重力的作用下锤头向下砸，致使防沙网杆能够稳固插入沙土之中。

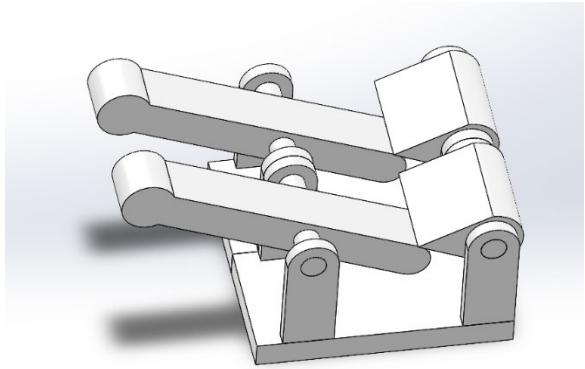


Figure 11. Schematic diagram of the downward pressure device
图 11. 下压装置示意图

4.3. 防沙网杆随机铺设装置设计

为了能够将防沙网杆随机的铺设到沙土之中，在铺设防沙网杆的间隙，还需要调整防沙网杆铺设的角度，其原理如图 12 所示(单位: cm)。网子的长度由连杆固定为 100 cm。根据曲柄连杆机构存在的条件: (1) 曲柄是最短杆; (2) 最短杆与最长杆的长度之和小于或等于其余两杆长度之和。当最短杆与最长杆长度之和小于或等于其余两杆长度之和时，以最短杆为机架构成双曲柄机构。设计如图所示的机构，当下压机构将防沙网杆砸入沙土之后，主动杆开始转动一定的角度 θ ，当转动完毕后，电动机带动曲轴一直旋转，下压长杆的一端，使垂头抬起，完成一个周期的运动，致使另一次的下压运动开始，改变防沙网杆插入沙土中的相对角度，从而达到随机角度铺设的目的。当主动杆靠近座体时，则会以 θ 向相反方向转动，逐步回到初始位置。

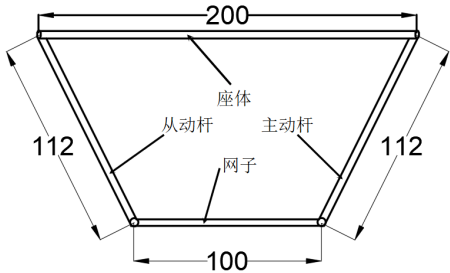


Figure 12. Schematic diagram of the random laying device of the sand prevention net pole
图 12. 防沙网杆随机铺设装置原理图

本随机沙障铺设车的设计采用轻量化的设计原则，将一个单人驾驶的小型车辆改装便可配置完成，在不规则沙丘上行驶，完成随机沙障铺设过程。在实践中，可以通过在小车上引入物联网技术[27]。通过安装各种传感器和通讯设备，小车能够实时收集沙漠环境数据(如温度、湿度、风速等)，并实现远程监控

和控制,提高铺设精度和效率。

5. 结语

在我国沙漠化严峻的背景下,本文的随机沙障治沙方法,不仅可以保护沙漠中的公路、高速公路、铁路、高铁等(线),而且对位于沙漠中的城镇、景点等关键位置(点),也有防止沙漠侵蚀的作用。

例如,对“线”的保护作用,各种交通网络如京新高速 G7、新疆高铁及普通铁路在穿越腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠和塔克拉玛干沙漠时,均面临风沙侵袭的挑战。传统的治沙措施如草方格虽然在一定程度上减少了沙尘对交通的影响,但其铺设费时费力,且经济投入大。

对“点”的保护作用,塔克拉玛干沙漠中有一些小城,例如塔中镇有 2 万人口,常年受沙尘侵蚀的威胁。如果不加以控制,也许是楼兰古城命运的复现。目前,虽然塔中镇周边,经过几十年的人工植树,为其筑起了一道屏障,但频繁的灌溉对于这片水资源匮乏的土地来说,是一种难以为继的方式。虽然塔中镇在镇上修建了一口极其珍贵的汲水井,但水极其珍贵,因为离开了这口井的水,塔中镇便成为一座废城。位于巴丹吉林沙漠中的 5A 景点额济纳胡杨林,被誉为“植物活化石”。金秋时节,金色的胡杨汇集成金色的海洋,景色如诗如画。为了保护这片纳胡杨林,园区在周边种植了上百万多株梭梭树。

本文提出的随机沙障技术为沙漠化治理提供了一个快速、高效且经济的解决方案。不仅能够在规定时间内完成大面积的保护性拦沙网的铺设,还能够减少对珍稀水资源的依赖。这种新型技术为确保我国交通网络的畅通和沙漠周边社区的稳定生态环境提供了有力保障。

6. 展望

随着我国经济和社会的发展,未来在巴丹吉林沙漠、塔克拉玛干沙漠周围,乃至内部将会有更多的高速公路和高铁铺设,以满足日益增长的交通和沟通需求。这无疑将进一步增加对治沙技术和方法的依赖,以确保交通设施的稳定和安全。在此背景下,本文中提出的随机沙障及其配套沙障车的设计将发挥重要的作用。不仅能够在短时间内为新建交通网络提供必要的沙漠防治保障,还可为已有交通设施提供快速响应的维护和保护措施。

总体而言,随机沙障的技术研究和实际应用将为我国在沙漠地区的交通建设与保障工作提供坚实的技术支撑,助力实现沙区的可持续发展与交通畅通。

基金项目

国家自然科学基金(62072463)资助。

参考文献

- [1] 刘国华,傅伯杰,陈利顶,等.中国生态退化的主要类型、特征及分布[J].生态学报,2000,20(1):13-19.
- [2] 肖建华,屈建军,姚正毅,等.新时期中国沙漠地区综合治理现状、问题及发展战略[J].水土保持通报,2022,42(2):377-385.
- [3] 张伟民,杨泰运,屈建军,等.我国沙漠化灾害的发展及其危害[J].自然灾害学报,1994(3):23-30.
- [4] 王涛,赵哈林,肖洪浪.中国沙漠化研究的进展[J].中国沙漠,1999,19(4):299-311.
- [5] 张正偲,董治宝,赵爱国,等.沙漠地区风沙活动特征——以中国科学院风沙观测场为例[J].干旱区研究,2007,24(4):550-555.
- [6] 朱震达,刘恕,邸醒民.我国沙漠研究的历史回顾与若干问题[J].中国沙漠,1984(2):7-11.
- [7] 吴正.中国沙漠与治理研究 50 年[J].干旱区研究,2009,26(1):1-7.
- [8] 陈舜瑶,著.沙都散记[M].兰州:甘肃教育出版社,1990:196.
- [9] 刘嫔心.包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建立及其效益[J].中国沙漠,1987(4):4-14.

-
- [10] 邹本功, 丛自立, 刘世建. 沙坡头地区风沙流的基本特征及其防治效应的初步观测[J]. 中国沙漠, 1981(1): 37-43.
- [11] 杨婷婷, 姚国征, 王满才, 等. 乌兰布和沙漠天然灌丛防风阻沙效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(1): 194-197.
- [12] 冯连昌, 刘建平. 铁路防风沙技术措施及技术要点[J]. 铁道建筑, 1987(10): 16-19, 27.
- [13] 李宏, 赵爱国, 庄维健, 等. 拦沙环工程抗风蚀性能研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 252-256.
- [14] 牛存洋, 阿拉木萨, 宗芹, 等. 科尔沁沙地流动沙丘塑料防沙网防风固沙效果试验[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 12-16.
- [15] 屈建军, 洪贤良, 李芳, 等. 聚乳酸(PLA)网格沙障耐老化性能及防沙效果[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 51-58.
- [16] 屈建军, 喻文波, 秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应试验[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1185-1193.
- [17] 洪贤良, 屈建军, 张建青, 等. 高密度聚乙烯(HDPE)防沙网使用寿命评估[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 1-6.
- [18] 孙雨橦, 袁杰潮, 闫路诚, 等. 固沙草方格铺设机械技术现状及技术瓶颈[J]. 林业机械与木工设备, 2022, 50(3): 4-7.
- [19] 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.
- [20] 叶榕伟, 黎华振, 李高龙, 等. 小型草方格铺设机系统机构[J]. 农业机械, 2023(4): 86-89, 96.
- [21] 刘晋浩, 潘海兵, 舒庆. 草方格铺设机器人多体动力学仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 153-157.
- [22] 赵玉平, 邵明杰. 敦煌莫高窟的“A”字形尼龙防沙网[J]. 地理教学, 2009(1): 5.
- [23] 刘湘杰. 几何形状对 2 种沙障防风固沙效果的作用研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [24] 王振亭, 郑晓静. 草方格沙障尺寸分析的简单模型[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 229-232.
- [25] 王佳斌, 崔言晨, 张庆宇, 等. 风速对草方格沙障防沙效果的影响研究[J]. 中国水土保持, 2021(12): 44-46.
- [26] 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.
- [27] 弭宝瞳, 梁循, 张树森. 社交物联网研究综述[J]. 计算机学报, 2018, 41(7): 1448-1475.