

干燥致密土壤在沙粒流冲击下的磨蚀规律

吴盈盈^{1,2}, 刘旭阳³, 王振亭^{1*}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 在土壤风蚀过程中, 跃移颗粒对表土的冲击磨蚀是公认的一种重要起尘机制。磨蚀体现了跃移沙与土壤相互作用, 受沙粒跃移运动参数和土壤力学性质共同控制。然而, 现有风蚀模型尚未充分考虑土壤力学性质的地位与作用, 缺少磨蚀速率计算公式, 亟需从固体力学角度探讨土壤磨蚀规律。该研究借鉴岩石磨蚀模型, 针对含水率小于 1.5%、体密度大于 $1.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的干燥致密土壤, 提出了代表单位时间内的碰撞次数、土壤抗压强度和杨氏模量、入射沙粒动能和密度等综合效应的磨蚀变量; 通过标准压缩试验测得黏土、砂土、壤土、砂质黏土、壤质黏土共 5 种人工均质土壤的抗压强度和杨氏模量的范围分别为 0.823~4.092 MPa 和 0.043~0.149 GPa; 利用自行设计的冲击磨蚀试验得到了干燥致密土壤在沙漠沙颗粒流冲击作用下的磨蚀规律, 即磨蚀速率是磨蚀变量的线性函数, 其斜率与截距分别为 3.27×10^4 和 -0.027 kg/s 。研究结果有助于恰当描述风蚀模型中的土壤力学性质、准确计算风蚀速率, 进而服务于农田防护和水土保持工程, 并为中国西北干旱区天然地貌和人工建筑风蚀现象的研究提供理论依据与数据支撑。

关键词: 土壤; 磨蚀; 土力学; 力学参数测量; 磨蚀速率; 磨蚀变量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.036

中图分类号: S152.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0315-06

吴盈盈, 刘旭阳, 王振亭. 干燥致密土壤在沙粒流冲击下的磨蚀规律[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 315-320.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.036 <http://www.tcsae.org>

Wu Yingying, Liu Xuyang, Wang Zhenting. Abrasion law of dry and dense soil under the bombardment of sand grain flows[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 315-320. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.036 <http://www.tcsae.org>

0 引言

土壤是人类赖以生存和发展的重要资源。干旱和多风同期发生的气候特点使沙漠、沙地、季节性裸露农田和草地广泛分布的中国北方干旱和半干旱地区经常发生土壤风蚀^[1-2], 尤以旱作农田为甚^[3]。因富含营养物质的细颗粒流失, 土壤肥力下降, 农田和草地甚至在表土持续粗化情况下演变为难以自然恢复的风蚀劣地或戈壁滩。同时, 随风而起的大量粉尘容易造成空气和水体污染, 产生一系列环境问题。因此, 了解土壤风蚀动力基本规律是科学开展风蚀防治与生态修复的重要前提。

颗粒分离, 即沙尘颗粒脱离土壤母体进入空气中, 是土壤风蚀动力学过程的首要环节^[4]。气流吹蚀、运动颗粒的冲击磨蚀、团聚体移动时的破碎为三种基本分离方式^[5-6]。无论单颗沙粒, 还是土壤团聚体, 跃移均是其在气流作用下的主要运动方式。这些跃移颗粒对地面碰撞所导致的起沙起尘是土壤风蚀中最重要的一动力学过程^[5]。早期的颗粒分离与起动研究工作多关注于松散沙土^[7]。例如, 贺大良等^[8]通过大量风洞试验归纳总结出“斜面飞升”

等两大类共八种跃移起尘机制; Lu 等^[9]建立了跃移沙颗粒碰撞松散沙土的数理模型, 发现起尘量正比于碰撞速度的 2 或 3 次方。目前, 描述风沙流发生与发展的力学模型^[5,10]已经建立, 可根据摩擦速度或跃移输沙率计算地表粉尘释放通量。与松散沙土类似, 以各类黏性土壤为研究对象的风洞试验也已广泛开展^[11-13], 并得到很多经验公式。为了建立气候变化模型中的大气粉尘模块, Kok 等^[14-15]在考察前人得到的固体碰撞破坏时的临界能量和脆性材料在受到冲击后所产生碎片的几何特征后, 试图通过解析方式确定由跃移沙粒碰撞磨蚀和团聚体破坏所产生的粉尘量和粒度分布。众多的土壤风蚀半机理模型在模拟释尘量时, 经常依据沙尘颗粒受到气流拖曳力和重力的相对大小构建起尘通量公式, 例如被应用于河北省 2013 年粉尘释放量模拟的 CLM4.5 模型^[16]。上述为方便计算或数据处理而提出的参数化方案往往不涉及土壤风蚀动力过程, 难以揭示跃移颗粒对黏性土壤碰撞磨蚀的力学本质, 尚未得到一般性的定量规律。

土壤风蚀研究具有多学科交叉的显著特征, 力学属于其中的基础学科。为了刻画土壤力学性质, 先后出现断裂模量^[17]、结合能^[18]、侵入能^[19]、抗剪强度^[20]等概念。由于理论模型的缺乏, 这些概念往往很难直接应用于土壤风蚀速率的预测。从近年来出现的风蚀指标体系和观测方法^[21]中没有土壤力学参数的事实看, 包括冲击侵蚀在内的力学过程研究仍然任重道远。在国内, 以气流剪切力与土壤强度相对大小为判据构建土壤风蚀动力学模型的试验工

收稿日期: 2021-12-07 修订日期: 2022-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971011、U21A2001)

作者简介: 吴盈盈, 研究方向为风沙物理与治沙工程。

Email: wuyingying20@mails.ucas.ac.cn

*通信作者: 王振亭, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与地貌学。Email: wangzht@lzu.edu.cn

作^[22-24]正在进行中。本研究借鉴岩石磨蚀模型^[25-27], 采用接触力学理论模型与压缩和磨蚀试验相结合的方法, 探讨沙漠沙颗粒冲击下干燥致密土壤的磨蚀规律, 以期为准确计算风蚀速率和提高风蚀模型提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤碰撞磨蚀理论基础

虽然目前缺少土壤碰撞磨蚀理论, 但关于陶瓷和金属等其他材料的碰撞、磨损和侵蚀模型却非常丰富^[28]。其中, 岩石磨蚀模型对跃移颗粒冲击磨蚀研究具有重要参考价值。Greeley 等^[29]通过室内试验发现, 单次碰撞的岩石磨蚀量大约正比于入射颗粒的动能。杨氏模量和强度这两个力学参数的引入^[30]克服了此前磨蚀研究中缺乏目标体力学性质的不足。目前, 研究团队已根据接触力学和强度理论建立了岩石磨蚀模型^[25-26], 其适用性亦为近期室内试验^[27,31-32]所证实。

土壤由无机固体、有机固体、水和空气组成。在工程领域, 弹性体常作为土体的一阶近似^[33]。当含水率很低且结构致密时, 土壤具有与脆性材料相似的力学性质, 其单次碰撞的磨蚀体积可借用岩石冲击磨蚀模型^[25-27]的结果表示。

$$\frac{V}{d^3} = c_0 \frac{\rho v_0^2 E}{\sigma_c^2} \sqrt{\frac{\sigma_c}{E}} \quad (1)$$

式中 c_0 为待定的无量纲常数; V 为磨蚀体积, m^3 ; ρ 为入射沙粒密度, kg/m^3 ; d 为入射沙粒粒径, m ; v_0 为入射沙粒速度, m/s ; E 为土壤的杨氏模量, Pa ; σ_c 为土壤的抗压强度, Pa 。

实际上, 单次磨蚀体积 V 非常微小。由多次碰撞后的总质量损失计算平均磨蚀速率是切实可行的^[29]。在第一个土壤风蚀经验方程^[34-35]中, 土壤可蚀性指标被定义为单位面积的光滑、平坦、裸露地表在单位时间内的潜在质量损失。据此, 将单位面积土壤在单位时间由跃移颗粒冲击磨蚀造成的质量损失定义为磨蚀速率。给定碰撞面积, 土壤磨蚀速率 ζ 的理论表达式为

$$\zeta = n \rho_b V = c_0 \frac{n \rho_b \rho d^3 v_0^2 E}{\sigma_c^2} \sqrt{\frac{\sigma_c}{E}} \quad (2)$$

式中 n 为单位时间内的碰撞数, s^{-1} ; ρ_b 为土壤体密度, kg/m^3 。式(2)综合体现了入射颗粒动能和土壤破坏时的应变能密度与最大应变三方面效应。

简单起见, 记 $\zeta = \frac{n \rho_b \rho d^3 v_0^2 E}{\sigma_c^2} \sqrt{\frac{\sigma_c}{E}}$, 称为“磨蚀变量”,

意为决定磨蚀速率的自变量。如果式(2)适用于干燥致密土壤, 那么磨蚀速率实测值 η (kg/s) 可写为

$$\eta = c_0 \zeta + c_1 \quad (3)$$

式中 c_1 为待定常数, kg/s 。

在前人工作中, 土壤磨蚀速率^[29]与力学参数^[23,36]往往独立测量。利用现有数据, 难以确定磨蚀变量及其对应的磨蚀速率。因此, 需要设计与开展不同试验, 检验或修正上述理论公式。

1.2 试件制备与参数测量

为了避免原状土空间异质性带来的实际困难, 按统

一标准制备了土壤样品与试件, 具体操作如下: 1) 分别采集鄂尔多斯高原红黏土 (108.73°E , 40.53°N)、河套平原灌淤土 (107.41°E , 40.70°N)、黄土高原西部黄土 (103.96°E , 36.30°N) 若干, 粉碎并筛出 $100 \mu\text{m}$ 以下各组分备用; 2) 以红黏土、灌淤土、黄土作为第 1 至 3 类土壤。按质量比 1:3 分别将红黏土另两种筛分土样混合, 作为第 4 和第 5 类土壤。按国际制土壤质地分类标准, 这 5 种土壤分别属于黏土、砂土、壤土、砂质黏土、壤质黏土, 依次记为 S1 至 S5; 3) 在土壤颗粒中加入适量的纯水, 混合均匀。以内径 60.8 mm 、高 20 mm 的土壤环刀为模具, 每种土壤制造 10 余个圆柱体磨蚀试件; 4) 将试件在约 20°C 室温和 15% 相对湿度的条件下自然干燥一周, 用于磨蚀试验。同时, 针对每种土壤类型, 利用岩石切割机 and 砂轮将圆柱体试件切割打磨成同一尺寸的长方体压缩试件各 4~5 个。因参数设置不当或操作失误而导致试验失败事件时有发生, 故磨蚀和压缩试件的制备数量多于实际需要。

土壤含水率通过标准烘干法测量。压缩试件长、宽、高均由游标卡尺测量。沙粒密度 ρ 和土壤体密度 ρ_b 按常规方法由实测的质量和体积数值计算而得。

1.3 压缩试验

为了测量土壤强度 σ_c 和杨氏模量 E , 利用美斯特-CMT4505 型万能试验机按标准流程进行单向压缩试验。其中, 试件几何尺寸是唯一需要输入到专用数据记录和处理软件中的参数。试验过程中, 试件的轴向载荷和变形由力和位移传感器测量并自动记录。万能试验机的操控软件实时计算应力与应变数值, 绘制并输出外力-位移和应力-应变曲线。每类土壤测量 3~4 个试件, 根据试验结果计算力学参数。

1.4 磨蚀试验

土壤磨蚀试验步骤与岩石磨蚀试验^[27]完全相同, 由专门设计的喷沙装置完成, 见图 1。该装置也可用于探讨戈壁地表附近的跃移运动特征^[37]。具体功能模块包括空气压缩机、进气口、进沙口、出沙口、压力调节阀、计时器等。由空气压缩机产生的压缩空气为整个装置提供了基本动力。进气口和进沙口分别通过水平和垂直管道与出沙口相连, 到达水平管道的来沙被气流加速后从出沙口喷出。喷沙时间和沙粒初速度分别由空气压缩机出口处的计时器与压力调节阀控制。空气压力阀规格根据试验需求购置与安装。出沙口与实验室的气压差在 $0 \sim 1.38 \text{ kPa}$ 范围内可调。试验用沙为筛分后的库布齐沙漠天然沙, 粒径范围 $200 \sim 250 \mu\text{m}$ 。试验过程中, 将出沙口对准固定于铁架台上的圆柱体试件的底面中心, 设置完成进气口气压, 在开启计时器的同时向进沙口持续供沙, 直至计时结束, 进气口阀门自动关闭。利用分析天平测量单个试件的质量损失后, 根据试验时间计算平均磨蚀速率。为了得到每组试验对应的磨蚀变量 ζ , 还需要确定粒径 d 、初速度 v_0 和碰撞速率 n 。粒径 d 近似取为 $225 \mu\text{m}$ 。垂直于圆柱形土壤试件底面的沙粒初速度 v_0 由平抛运动在水平和垂直方向的位移估算, 磨蚀试验开始前专门建立其与出沙口气压的对应关系。单位时间内的碰撞数 n

由进沙口的质量流量估算，约 $1.5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。不同于岩石磨蚀试验^[27]，喷沙速度较低且试验时间仅有十秒到几分钟的较短时间，这是因为土壤强度远远低于岩石。当地表处于风蚀状态时，风沙流通常处于非饱和状态，跃移速度大于流沙地表。因而，需要设置较高的喷沙速度。喷沙速度的准确调控受空气压力阀精度限制，考虑气压差为射流速度的二次函数，每种土壤均开展 10.9、12.0、13.1、14.4、15.0、16.6 和 17.4 m/s 共 7 种速度下的磨蚀试验。

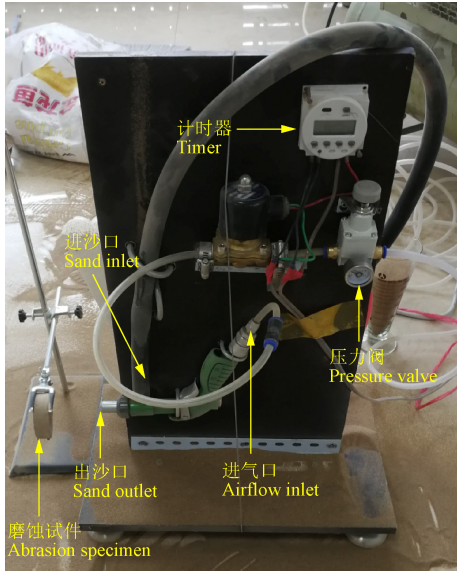


图 1 磨蚀试验喷沙装置

Fig.1 Sandblasting device for abrasion experiments

2 结果与分析

2.1 应力-应变关系

单向压缩试验表明，5 种人工土壤都具有显著的脆性属性。图 2 给出了典型应力-应变曲线。在加载初期，应变随着应力的增加而线性增长。应力到达最大值时，试

件发生破坏。此后，应变仍继续增加，试件发生局部破坏。除了诸如图 2 中 S1 试件迅速剪切破坏的极个别情况，绝大多数试件都存在一定的残余强度。干燥致密土壤的这种力学行为与冲击磨蚀理论模型^[25-26]对目标体的线弹性假设相一致。抗压强度取破坏点处的应力，杨氏模量也由此处的应力和应变而得到。表 1 列出了 5 种土壤试件的含水率、体密度、抗压强度和杨氏模量的平均值。与自然界常见土壤相比，土壤试件含水率（小于 1.5%）远低于干土（约 8%），体密度明显高于干沙（ $1.30 \times 10^3 \sim 1.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ），从而将其定性描述为干燥致密土壤。

表 1 土壤试件的物理和力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil specimens

土壤类型 Soil type	含水率 Water content /%	体密度 Bulk density /($10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度 Compressive strength /MPa	杨氏模量 Young's modulus /GPa
S1	1.48	1.85	4.092	0.149
S2	0.63	1.64	2.413	0.077
S3	0.43	2.11	0.823	0.043
S4	0.47	1.73	2.277	0.085
S5	0.33	1.64	1.276	0.138

注：S1-黏土；S2-砂土；S3-壤土；S4-砂质黏土；S5-壤质黏土。下同。
Note: S1-clay; S2-sand; S3-loam; S4-sandy clay; S5-loamy clay. Same as below.

2.2 磨蚀速率

由于试件干燥致密，沙粒在低速碰撞后均发生反弹，不存在嵌入现象。根据不同喷沙速度和土壤类型，原本光滑平整的圆柱体试件底面在十几秒到几分钟不等时间之内出现明显的圆形冲击坑，见图 3（裂纹和小孔洞主要由水分不均匀蒸发造成，并非源于磨蚀作用）。在气动力和重力共同作用下，天然沙漠沙从出沙口到碰撞点的运动轨迹易偏离直线。试件表面发生微小侵蚀后，初始阶段的正碰很快变成了斜碰。这些因素导致冲击坑直径明显大于喷沙装置出沙口。若冲击时间太长，冲击坑会贯穿至圆柱体试件下表面，数据分析时做舍弃处理。

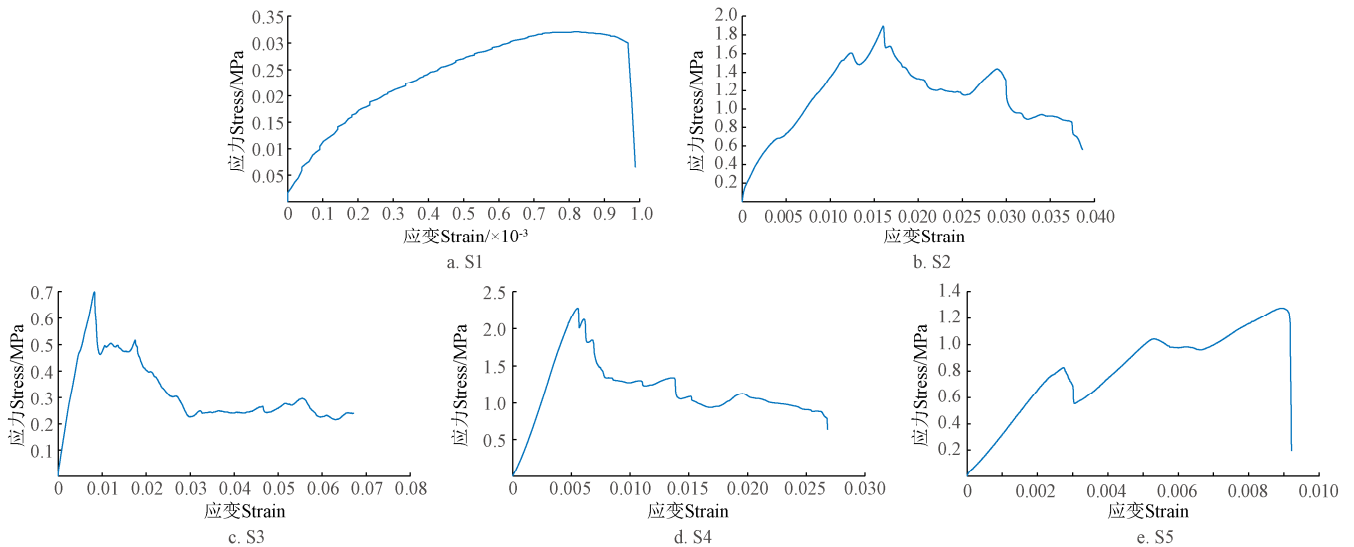


图 2 五种土壤的典型应力-应变曲线

Fig.2 Typical stress-strain curves for five types of soils

本试验中磨蚀变量的取值范围为 $0 \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{ g/s}$ 。

图 4 给出了磨蚀速率随磨蚀变量的变化情况，二者之间

具有良好的线性关系。对所有试验数据做线性拟合, 优度判定系数为 0.82, 试验结果与理论预期相符, 说明由岩石冲击磨蚀模型^[26]导出的磨蚀速率公式适用于干燥致密土壤。主要原因有三: 首先, 人工土壤满足了连续性、均匀性、各向同性等弹性力学基本假设; 其次, 这种脆性材料在外力作用下破坏与否能够由最大应力准则来判断; 最后, 单次碰撞造成的破坏范围远小于试件自身尺寸符合 Hertz 接触理论^[38]的前提假设。对试验数据进行最小二乘拟合, 式 (3) 中的两个常数为 $c_0=3.27 \times 10^4$, $c_1=-0.027 \text{ kg/s}$ 。Hertz 接触理论得到的应力场在碰撞点处具有奇异性。也就是说, 不管多大的碰撞速度, 目标体总会被磨蚀, 不符合实际情况。 $c_1 < 0$ 的物理意义在于, 只有在磨蚀变量大于某个临界值时, 才会发生磨蚀, 符合实际情况。磨蚀变量 ζ 是多个参数的综合表现。在本试验不同土壤的物理和力学参数中, 抗压强度的差别尤为明显 (表 1)。S1 和 S3 分别具有最大与最小的抗压强度, 相应地, 图 4 中 S1 的磨蚀速率明显低于其他土壤, S3 则偏高。



图 3 磨蚀试件表面形态

Fig.3 Surface morphology of the abrasion specimen

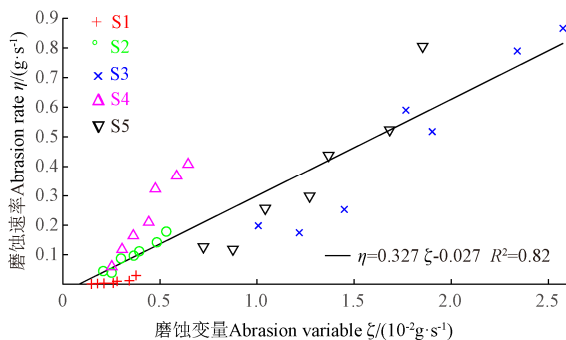


图 4 磨蚀速率随磨蚀变量的变化

Fig.4 Change of abrasion rate with abrasion variable

虽然人工制备的干燥致密土壤是高度理想化的, 但由此得到的磨蚀规律为研究中国西北干旱区干湖盆、古河床、雅丹、古城遗址等自然地貌和人工建筑的磨蚀现象提供了基本依据。例如, 因为材料组成与力学性质相近, 图 4 中给出的线性拟合公式能够直接应用于河西走廊地区夯土长城或古城墙磨蚀速率的估算。对于该地区荒漠绿洲过渡带弃耕农田的风沙流磨蚀问题, 则需要将原状土样运回室内, 测量抗压强度和杨氏模量, 并开展少量试验以修正线性关系中的斜率和截距, 然后结合沙源丰富度、沙粒粒径、风速大小等野外实况, 估算给定面积在一定时间内的磨蚀量。当土壤孔隙度较高或含水

率不可忽略时, 应力-应变关系与脆性材料相去甚远, 式 (3) 不再适用。在这种情况下, 依然可以按相同思路进行理论模型的探索^[24]。此时, 脆性材料的抗压强度被黏性土内聚力和内摩擦角取代, 由 Mohr-Coulomb 准则判断土体是否破坏。由于入射颗粒嵌入、气流吹蚀、水分蒸发等动力过程与磨蚀相伴发生, 无论是理论模型还是模拟试验都面临很大挑战。

3 结论

通过对 5 类人工制备土壤试件的系列压缩和磨蚀试验, 得到以下初步结论:

1) 单向压缩试验表明, 干燥致密土壤的力学行为具有脆性材料的基本特征。应变大体上随应力增加而线性增长至最大值。当宏观破坏发生后, 往往存在一定程度的残余强度。由应力-应变曲线中最大应力点计算的抗压强度和杨氏模量范围分别为 0.823~4.092 MPa 和 0.043~0.149 GPa。

2) 冲击磨蚀试验显示, 根据接触力学和强度理论建立的岩石磨蚀模型适合于干燥致密土壤。解析形式的磨蚀变量综合体现了入射颗粒动能和土壤破坏时的应变能密度与最大应变三方面的效应。干燥致密土壤在沙漠沙颗粒流冲击作用下的磨蚀速率是磨蚀变量的线性函数, 当磨蚀变量小于 $3.0 \times 10^{-2} \text{ g/s}$ 时, 斜率与截距分别为 3.27×10^4 和 -0.027 kg/s 。

致谢: 中科院西北生态环境资源研究院柳本立设计制造了喷沙装置, 赖俊华参加磨蚀试验, 何晨晨参与稿件修改, 谨致谢忱。

[参考文献]

- [1] Dong Z B, Wang X M, Liu L Y. Wind erosion in arid and semiarid China: An overview[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(4): 439-444.
- [2] Guo Z L, Huang N, Dong Z B, et al. Wind erosion induced soil degradation in Northern China: Status, measures and perspective[J]. Sustainability, 2014, 6(12): 8951-8966.
- [3] 臧英, 高焕文. 国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 195-198.
Zang Ying, Gao Huanwen. Research on occurrence mechanism and control technology of wind erosion in agricultural lands[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(3): 195-198. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张春来, 宋长青, 王振亭, 等. 土壤风蚀过程研究回顾与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 27-41.
Zhang Chunlai, Song Changqing, Wang Zhenting, et al. Review and prospect of the study on soil wind erosion process[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 27-41. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shao Y P. Physics and Modelling of Wind Erosion[M]. Heidelberg: Springer, 2008.
- [6] Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust[J]. Reports on Progress in Physics,

- 2012, 75(10): 106901.
- [7] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen, 1941.
- [8] 贺大良, 刘大有. 跃移砂粒起跳的受力机制[J]. 中国沙漠, 1989, 9(2): 14-22.
He Daliang, Liu Dayou. Force mechanism of lifting off saltation sand particles[J]. Journal of Desert Research, 1989, 9(2): 14-22. (in Chinese with English abstract)
- [9] Lu H, Shao Y P. A new model for dust emission by saltation bombardment[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D14): 16827-16842.
- [10] Zheng X J. Mechanics of Wind-blown Sand Movements[M]. Heidelberg: Springer, 2009.
- [11] 刘连友, 王建华, 李小雁. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J]. 科学通报, 1998, 43(15): 1663-1666.
Liu Lianyou, Wang Jianhua, Li Xiaoyan. The wind tunnel simulated determination on erodible soil particles in cultivated soils[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(15): 1663-1666. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 土壤含水率及物理性砂粒含量对风蚀模数影响的风洞模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 188-195.
Zhao Peiyi, Tuo Debao, Li Huanchun, et al. Effects of soil moisture and physical sand content on wind erosion modulus in wind tunnel testing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 188-195. (in Chinese with English abstract)
- [13] Dai Y J, Zhang C L, Cen S B, et al. Abrasion of soil clods with different textures and moisture contents in sand flow environment[J]. Aeolian Research, 2020, 46(3): 100614.
- [14] Kok J F. A scaling theory for the size distribution of emitted dust aerosols suggests climate models underestimate the size of the global dust cycle[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(3): 1016-1021.
- [15] Kok J F, Mahowald N M, Fratini G, et al. An improved dust emission model – Part 1: Model description and comparison against measurements[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(23): 13023-13041.
- [16] 王小伟, 王卫. 基于 CLM4.5 土壤风蚀模型的河北省土壤释尘量模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 1-9.
Wang Xiaowei, Wang Wei. Simulation of dust emissions in Hebei Province based on CLM4.5 soil wind erosion model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [17] Richards L A. Modulus of rupture as an index of crusting of soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1953, 17(4): 321-323.
- [18] Shao Y P, Raupach M R, Findlater P A. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1993, 98(D7): 12719-12726.
- [19] Rice M A, McEwan I K, Mullins C E. A conceptual model of wind erosion of soil surfaces by saltating particles[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(5): 383-392.
- [20] Wilson G. Modeling Wind Erosion: Detachment and Maximum Transport Rate[D]. Texas: Texas Tech University, 1994.
- [21] Webb N P, Herrick J E, van Zee J W, et al. Standard Methods for Wind Erosion Research and Model Development: Protocol for the National Wind Erosion Research Network[M]. New Mexico: USDA-ARS Jornada Experimental Range, 2015.
- [22] Zou X Y, Zhang C L, Cheng H, et al. Cogitation on developing a dynamic model of soil wind erosion[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(3): 462-473.
- [23] Fang Y, Cheng H, Zou X Y, et al. Shear strength of aeolian sand sediments[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(2): 583-590.
- [24] Liu X Y, Ning W X, Wang Z T. Theoretical expressions for soil particle detachment rate due to saltation bombardment in wind erosion[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2020, 12(4): 234-241.
- [25] Wang Z T, Wang H T, Niu Q H, et al. Abrasion of yardangs[J]. Physical Review E, 2011, 84(3): 031304.
- [26] Wang Z T. Erosion model for brittle materials under low speed impacts[J]. Journal of Tribology, 2020, 142: 074501.
- [27] 王振亭, 刘旭阳, 李孝泽, 等. 西沙-南沙珊瑚礁灰岩抗蚀性特征[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(6): 71-76.
Wang Zhenting, Liu Xuyang, Li Xiaoze, et al. Anti-erodibility of coral reef limestones on the Xisha-Nansha Islands[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(6): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- [28] Tarodiya R, Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions: A review[J]. Powder Technology, 2021, 387: 527-559.
- [29] Greeley R, Leach R N, Williams S H, et al. Rate of wind abrasion on Mars[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1982, 87(B12): 10009-10024.
- [30] Sklar L S, Dietrich W E. A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load[J]. Water Resources Research, 2004, 40(6): W06301.
- [31] Miller K L, Jerolmack D. Controls on the rates and products of particle attrition by bed-load collisions[J]. Earth Surface Dynamic, 2021, 9: 755-770.
- [32] Bodek S, Jerolmack D. Breaking down chipping and fragmentation in sediment transport: The control of material strength[J]. Earth Surface Dynamic, 2021, 9: 1531-1543.
- [33] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. New York: Wiley, 1996.
- [34] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control[J]. Advances in Agronomy, 1963, 15: 211-302.
- [35] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(5): 602-608.
- [36] Zhang C L, Wang X S, Zou X, et al. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 178: 1-10.
- [37] Liu B L, Wang Z Y, Niu B C, et al. Large scale sand saltation over hard surface: A controlled experiment in still air[J]. Journal of Arid Land, 2021: 13(6): 599-611.
- [38] Barber J R. Contact Mechanics[M]. Cham: Springer, 2018.

Abrasion law of dry and dense soil under the bombardment of sand grain flows

Wu Yingying^{1,2}, Liu Xuyang³, Wang Zhenting^{1*}

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Saltation bombardment is a well-recognized dominant dust emission mechanism in the dynamic of soil erosion by wind. Since the abrasion can be caused by the interaction of saltating grains and soil, this specific process of particle transport can be jointly controlled by the saltation parameters of sand grains and the mechanical properties of soil. However, many current models of wind erosion cannot fully consider the function of soil, although some new concepts were suggested previously, such as rupture modulus, binding energy, and surface strength. Particularly, it is still lacking in the soil mechanical properties in wind erosion. Fortunately, the theoretical models of rock abrasion were greatly improved in classical mechanics in recent years. Some types of soil can also share the common characteristics with rocks, such as elasticity and failure behaviors. Therefore, it is a high demand to develop the new abrasion models for soil or rocks. In the presented study, a robust abrasion model of soil was proposed to determine the abrasion variable, considering the comprehensive effects of the impact number per unit time, the yield stress and Young's modulus of soil, the kinetic energy and density of the impacting sand grains. A series of experiments were conducted to examine the interaction between abrasion rate and abrasion variable. Firstly, five types of cylindrical specimens were prepared to cover the man-made, uniform, dry and dense soil, *i.e.* clay, sand, loam, sandy clay, and loamy clay. Secondly, the compressive strength and Young's modulus of the soil were measured using a standard universal testing machine. Thirdly, seven abrasion experiments were performed on each soil type. Among them, a newly developed sandblasting gun was also utilized under different impact speeds of natural desert sand grains with a nearly uniform sieve size. An analytical balance was used to measure the mean abrasion rates or mass loss per unit time. Meanwhile, the abrasion variable was calculated after measurement. The results revealed that the compressive strength and Young's modulus were 0.823-4.092 MPa and 0.043-0.149 GPa, respectively. There was a linear correlation in the abrasion rate of dry and dense soil, where the slope and intercept were 3.27×10^4 and -0.027 kg/s, respectively, when abrasion variable is less than 3.0×10^{-2} g/s. The theoretical model was agreed with the experimental data, because the uniform, dry and dense soil fully meets the assumption of perfect elasticity, and more importantly, the soils in this study behave as the brittle materials, similar to impact targets in rock abrasion models. The abrasion area per impact was much smaller than the target size in the Hertz contact model. The non-positive intercept in the rate-variable relation indicated that the abrasion occurred, once the abrasion variable was larger than the threshold. In addition, the detailed abrasion expressions vary in the types of soil, in terms of the compressive strength, Young's modulus, slope, and intercept. The finding can provide the data support for the wind erosion of various natural features and artificial structures, such as farmlands, dried lake bases, ancient riverbeds, yardangs, and ancient city ruins, which are widely distributed in the arid region of Northwest China.

Keywords: soils; abrasion; soil mechanics; mechanical variables measurement; abrasion rate; abrasion variable