

土壤风蚀可蚀性研究进展^①

南 岭¹, 杜灵通¹, 展秀丽²

(1 宁夏大学西部发展研究中心, 银川 750021; 2 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021)

摘 要: 土壤风蚀可蚀性是风蚀研究的重要内容, 也是进行土壤风蚀预报的重要参数。本文对土壤风蚀可蚀性的相关概念进行了阐释, 从土壤颗粒及团聚体、土壤水分、土壤结皮、地表不可蚀物质、土地利用方式和空间尺度等 6 个方面对风蚀可蚀性控制因素的研究进行了综合评述。然后对土壤风蚀可蚀性的指标按照间接指标和直接指标两个类别进行了归纳, 同时也对各个指标的监测方法进行了总结。在此基础上, 对未来土壤风蚀可蚀性的研究方向进行了展望, 讨论了土壤风蚀可蚀性研究需要关注的热点问题。

关键词: 土壤可蚀性; 风蚀; 指标; 监测方法

中图分类号: S157.1

风力侵蚀是土壤侵蚀的主要类型之一。在全球范围内, 易于遭受风蚀的土地约占陆地面积的 1/4^[1]。风蚀也是我国北方干旱、半干旱及部分半湿润地区土地退化的主要过程之一^[2]。根据全国第三次水土流失普查数据, 全国风蚀总面积为 195.70 万 km², 占国土总面积的 20.6%^[3]。土壤可蚀性是土壤侵蚀研究的重要内容, 而土壤风蚀可蚀性是土壤风蚀预报的重要参数。深入认识和正确评价土壤风蚀可蚀性时空特征及其影响因素, 是合理利用风蚀区域土地资源的主要依据, 也是防治土壤风蚀及其引起的土地退化的重要基础。

本文对土壤风蚀可蚀性的研究现状进行了详细述评, 分析了风蚀可蚀性的影响因素及其在不同环境和不同尺度下的变化规律, 总结了风蚀可蚀性的评价指标和监测方法。在此基础上, 对未来风蚀可蚀性的研究方向进行了展望, 讨论了风蚀可蚀性研究需要关注的热点问题。

1 土壤风蚀可蚀性的概念

土壤可蚀性指土壤对水和风等侵蚀营力造成的剥离和搬运的敏感程度^[4]。根据上述定义, 土壤风蚀可蚀性即为风蚀过程中土壤对于风力引起的剥离和搬运的敏感程度。我国开展的土壤风蚀可蚀性研究中, 多采用抗风蚀性这一概念。土壤可蚀性和抗侵蚀

性并非土壤的不同性质, 而是土壤内在属性在侵蚀过程中两个相对的表现形式。前者是指土壤对侵蚀作用的敏感性, 后者是指土壤对侵蚀作用的抵抗能力, 二者都反映了土壤性质与土壤侵蚀的关系^[5]。

2 土壤风蚀可蚀性的影响因素

土壤质地、土壤团聚体、矿物组成、有机质含量、土壤水分、土壤结皮及可蚀性颗粒含量等土壤性质共同决定着土壤风蚀可蚀性^[6]。土壤质地、矿物组成、有机质含量等会影响土壤颗粒的大小、持水特性及黏结力。土壤水分和黏结力又是形成团聚体和结皮所必需的; 同时, 它们又控制着易蚀性颗粒含量、地表粗糙度、以及发生风蚀的临界剪切力^[7]。此外, 地表不可蚀物质(如砾石、土块、植被等)的密度和分布影响着地表可蚀面积。

2.1 土壤颗粒及团聚体

土壤颗粒及团聚体对风蚀可蚀性有着直接的影响作用。风蚀可蚀性随表层土壤颗粒和团聚体粒径的增大而降低^[8], 粒径 > 0.84 mm 的土壤颗粒和团聚体难以被吹蚀, 为不可蚀性颗粒; 而粒径 < 0.84 mm 则为可蚀性颗粒, 其中, 粒径为 0.05 ~ 0.5 mm 的土壤颗粒最易被吹蚀。更深入的研究发现: 可蚀性颗粒粒径分布区间并不固定, 它会随着风速增大而增大^[9]。Chepil^[10]在 20 世纪 50 年代对影响风蚀的土壤性质进

^①基金项目: 国家自然科学基金项目(41201087)资助。

作者简介: 南岭(1983—), 男, 甘肃西和人, 助理研究员, 主要从事土壤风蚀与荒漠化研究。E-mail: nanling83@126.com

行了一系列实验,结果表明土壤风蚀可蚀性明显地受土壤中可蚀性颗粒的含量影响。在其他因子相同时,风蚀量随土壤中所含可蚀部分与不可蚀部分的比例而呈正比例变化。董志宝和李振山^[11]则将风成沙颗粒按可蚀性分为3种类型: $>0.7\text{ mm}$ 和 $<0.05\text{ mm}$ 为难蚀颗粒; $0.4\sim 0.7\text{ mm}$ 和 $0.05\sim 0.075\text{ mm}$ 的为较难蚀颗粒; $0.075\sim 0.4\text{ mm}$ 为易蚀颗粒。而且在相当粒径的条件下,混合沙粒较均匀粒径者易风蚀。Zamani和Mahmoodabadi^[12]在研究中将风速和风蚀量线性回归得到的斜率作为土壤风蚀可蚀性,结果表明土壤风蚀可蚀性和土壤粒径之间存在幂函数关系。

土壤中的团聚体结构和块状结构可以决定可蚀性颗粒的比例。在其他因素保持不变时,风蚀量随团聚体体积质量的平方根而变化^[13]。陈广庭^[14]发现土粒起动风速的大小并不取决于土壤单个颗粒的大小,而是取决于土壤团聚体平均直径的大小和组合情况。Leys等^[15]的试验表明,砂质土壤由于缺少形成土粒间黏结力的粉粒和黏粒,地表土体通常破碎成松散的非团聚土层,具有较高的风蚀可蚀性,而且变化幅度较小。黏质土壤在土粒之间有稳固的黏结力,在农业用地上会形成粒径范围很大的团聚体,但是黏粒含量太高时团聚体稳定性降低,因此,黏质土壤风蚀可蚀性的范围也很大。壤质土壤由于土粒间有增强的黏结力,但黏粒含量又没黏质土壤高,因此具有较低的风蚀可蚀性。

2.2 土壤水分

土壤中的水分能够在土壤颗粒之间产生拉张力,从而增强颗粒之间的内聚力,进而降低土壤风蚀可蚀性^[16]。土壤水分对风蚀的影响是通过增大起动风速来实现,土壤水分增大会使风蚀起动风速增大^[17]。董治宝和陈渭南^[18]针对风沙土的试验发现:风沙土临界风蚀风速随含水量的增加呈线性增大;风蚀率(风蚀强度)随含水量的增加呈二次幂函数减少。然而更深入的研究发现,只有当土壤含水量在一定临界值之下时,土壤风蚀可蚀性才会表现出上述规律,不同的土壤类型,具有不同的临界值^[19]。 20 g/kg 是沙质土壤的临界含水量, $<20\text{ g/kg}$ 时,风蚀可蚀性随含水量增加而降低,含水量 $>20\text{ g/kg}$ 时风蚀可蚀性趋于稳定。此外,土壤产生PM10的能力随土壤含水量升高呈对数下降^[20],这同样说明了土壤水分对降低风蚀可蚀性的重要作用。土壤水分的冻融循环也是影响土壤风蚀可蚀性的重要机制^[21]。

2.3 土壤结皮

土壤结皮会增强土壤抵抗侵蚀的能力,降低土壤风蚀可蚀性。结皮对风蚀可蚀性的影响主要表现在以下4个方面:①固结地表的可蚀性颗粒;②改变地表的粗糙度;③遭受扰动破碎后形成团聚体;④截获已被搬运的可蚀性颗粒^[22]。物理结皮和生物结皮对风蚀可蚀性的影响有着不同的影响机理。由于其物理、化学、生物机制的不同,不同类型的结皮对降雨和扰动有着不同的响应。这些物理、化学、生物特性会影响到结皮的盖度和强度、地表粗糙度、及可蚀性颗粒的比例^[23]。

Kohake等^[24]对比团聚体和结皮对风蚀可蚀性的影响发现,结皮土壤比良好团聚体结构的土壤更容易遭受磨蚀。结皮土壤的风蚀量为 $0.010\sim 0.068\text{ kg/m}^2$,与含砂量直接相关,与有机质含量反相关。在降水稀少的情况下,土壤的结皮厚度和强度随着降雨量的增大而增大。不同土壤形成的结皮厚度相近,但其强度存在明显差异。结皮强度的变化趋势与不同土壤之间黏粒含量的变化趋势一致^[25]。

降雨量及降雨频率、太阳辐射强度和潜在蒸发决定着土壤物理结皮和生物结皮的形成及结皮降解^[26-27]。结皮的形成通常由降雨触发,而结皮破碎的原因则很多:干燥脱水、光降解、机械扰动(包括牲畜踩踏和侵蚀过程的磨损)、田间耕作等^[28-29]。Scarlett^[30]的研究发现,扰动的空间分布和强度、扰动发生时的先期气候状况以及结皮地表的状况(结皮面积和强度)决定着扰动事件引起的结皮破坏的程度。结皮的破碎-修复循环也会引起物理结皮和生物结皮类型的转化^[22]。

2.4 地表不可蚀物质

地表不可蚀物质是指砾石、植被等一般情况下不能被风力所移动的物质。不可蚀物质的作用主要表现在以下两个方面:①它们与气流相互作用,消耗掉风力的一部分剪切力^[31];②在地面上形成庇护区,使得庇护区内的土壤受到的侵蚀力大大降低^[32]。不可蚀物质形成的庇护区包括自身的覆盖面积和下风方向的一定范围^[33]。不可蚀物质产生的庇护效应决定着可蚀面积(即暴露在侵蚀性风力之下的地表面积)^[32]。庇护区面积的大小由风力强度和方向、不可蚀物质空间分布决定^[32, 34]。

人为设置不可蚀物质是防治风蚀的一个重要途径。董治宝等^[35]通过风洞模拟实验研究了风蚀戈壁表面阻力系数与砾石粒径、覆盖度的关系,结果表明当砾石覆盖度大于 $40\%\sim 50\%$ 时,戈壁表面阻力系

数趋于常数。通过研究直立植物与砾石组合措施对防风蚀的作用,在理论上发现了达到最佳防风蚀效果的途径^[36]:理想而经济的选择应是 0.72 的植物侧影盖度或 0.225 的砾石覆盖度。当植物的侧影盖度 < 0.045 时,其防护作用的不足可由砾石覆盖物来补充。而当植物的侧影盖度 > 0.045 时,一般情况下砾石覆盖的增加对提高风蚀防治的效果并不明显。

2.5 土地利用方式

农业用地和牧业用地是风蚀危害的主要土地类型。农业用地是人类活动完全介入的,其风蚀可蚀性除了受到土壤性质的影响外,更重要的是受到耕作制度的影响。季节性的农业耕种、收获通常是由降水量和生长积温等气候条件所决定的。由于作物的生长循环和残茬的处理(如回田,焚烧等),裸露地表的面积会在一年内发生季节性变化。在农业用地上不同的耕作方式还会造成地表粗糙度的差异^[40]。团聚体粒径、犁沟深度及间隔等决定着地表粗糙度,进而影响风的剪切力^[37]。增加土垄的高度,可以降低风蚀量^[38]。由于保持高粗糙度能够减轻风蚀,这也是一项重要的风蚀防治措施。农业耕作会增加中质土壤(黏粒+粉粒在 215 ~ 500 g/kg 之间)的可蚀性颗粒,降低团聚体稳定性^[39]。

在牧业用地上,潜在侵蚀面积主要由地形和植被特性所决定。土地管理方式会引起植被结构的变化,牲畜也会对植被和表层土壤造成影响^[41]。由于放牧活动对于降水量和草被生长变化敏感,影响风蚀可蚀性的牧业用地管理措施通常随着气候而变化^[42]。

牧业用地和农业用地的土壤风蚀可蚀性具有不同的控制因子,主要原因是土壤的扰动机制和扰动强度存在差异。牧业用地上没有耕作活动对土层规律性的机械扰动,在土壤表层会形成更稳定的物理结皮和生物结皮。作为地表土壤湿化或微生物生长的结果,土壤颗粒重新排列形成的物理结皮或生物结皮对气候、土地管理措施及风蚀有着不同的响应机制^[26, 43]。在牧业用地上,由于结皮分布范围很大,固结土粒的作用也很强,结皮是牧业用地土壤风蚀可蚀性最重要的决定性因素^[44]。

2.6 空间尺度

空间尺度并不直接影响土壤风蚀可蚀性的大小,但它决定着哪些因素会是风蚀可蚀性控制因素。在最小的土粒尺度上,风蚀可蚀性受机械组成(质地)、矿物成分、含水量、黏结力、土壤化学性质和微生物等因素的影响^[45-46]。这些因素共同决定着土壤颗粒及团聚体的大小、重量和土粒间的黏结力,进而决定着

土粒被风力移动的临界摩擦速度。

在小区尺度上,土壤质地、含水量、土粒间的束缚力等土粒尺度的影响因素通过结皮、可蚀性颗粒含量来影响风蚀可蚀性^[10, 47]。同时团聚体和结皮又会影响到临界摩擦速度、地表粗糙度及可蚀性颗粒含量^[48]。

在景观尺度和区域尺度,土壤风蚀可蚀性的影响因素有:①土壤类型、地形、气候、生态类型区等环境因素;②土地利用方式^[49]。这些因素共同决定着土壤含水量、团聚体、地表结皮状况等小区尺度上发挥作用的控制因素。

3 风蚀可蚀性指标及监测方法

土壤风蚀可蚀性是一项综合性特征。评价特定土壤的风蚀可蚀性时,一般通过控制条件下监测实际土壤风蚀量或测定某些土壤性质作为风蚀可蚀性指标。由于风蚀可蚀性控制因素的多样性,因此发展出了很多风蚀可蚀性指标。针对这些指标的监测方法也随着技术进步而不断发展。表 1 对目前比较常用的一些风蚀可蚀性指标进行了总结。

土壤风蚀可蚀性指标可以分为两组:间接指标和直接指标。间接指标一般为影响风蚀可蚀性的某一项土壤特性或地表形态特征。地表可蚀性颗粒、团聚体粒径分布可以作为可被风力挟带的土壤的指标^[50]。通常情况下,土壤水分控制着地表潜在可蚀性颗粒,同时也影响风力移动地表沙尘的临界剪切力^[46]。团聚体稳定性和结皮破裂模数能反映团聚体和结皮对跃移质沙粒造成的冲击的抵抗能力。高稳定性的团聚体和高破裂模数的结皮具有更小的风蚀可蚀性^[75]。结皮盖度可以反映地表在何种程度上得到了固结,进而反映风力可移动的沙尘物质的量。地表粗糙度则可以同时影响土壤风蚀可蚀性和风的侵蚀能力^[48]。

风蚀可蚀性的直接指标包括临界摩擦速度、临界风速和输沙率。当地表风蚀可蚀性增大时,临界摩擦速度、临界风速将会降低。也就是说,在土壤风蚀可蚀性较低的地表,要造成土壤颗粒的移动需要更多的风能^[71]。输沙率是风的侵蚀能力和土壤的风蚀可蚀性的函数。在能够监测风速时,它是一个能够反映地表对风蚀敏感性的指标^[41]。

表 1 中列出的监测方法构成风蚀可蚀性试验研究的基础。然而由于土壤性质的空间差异性,对风蚀可蚀性的监测样点获得的数据仅代表很小的面积。理论上讲,所有这些指标都可以在小区尺度上监测其时间变化。然而所有这些监测方法都会对监测

表 1 土壤风蚀可蚀性指标与监测方法
Table 1 Summary of metrics and approaches for measuring soil erodibility for wind erosion

风蚀可蚀性指标	描述	指标类型	监测方法	文献
团聚体粒径分布	土壤团聚体的粒径分布， <0.85 mm 的为可蚀部分	间接指标	干筛法	[15]
			湿筛法	[44]
			旋转筛分法	[50–51]
团聚体稳定性	团聚体抵抗外力免遭崩解和分散的 性质	间接指标	旋转筛分法	[8]
			机械压碎法	[52–53]
地表粗糙度	反映地表起伏变化指标	间接指标	针式廓线法	[34]
			激光微地貌扫描仪	[54]
			链条法	[55–56]
			遥感	[57]
结皮盖度	地表被生物结皮或物理结皮所覆盖 的比例	间接指标	样方法	[58]
			对角线法	[59]
			摄影分析法	[60–61]
			遥感	[57]
结皮破裂模数	土壤结皮破裂所需的剪切应力	间接指标	贯入仪	[43]
可蚀性颗粒	地表可被风力移动的土壤颗粒，其 粒径<0.85 mm	间接指标	风洞试验	[48]
			真空收集器	[62–63]
土壤水分含量	即土壤的含水量，受体积质量、质 地等性质的影响	间接指标	田间取样测定	[53]
			模型求解	[64]
			遥感	[65]
临界摩擦速度	土壤颗粒或团聚体开始被风力移动 时的摩擦速度	直接指标	风速计	[28]
			Sensit 监测系统	[66]
			跃移传感器	[67]
			Safire 监测系统	[68]
临界风速	土壤颗粒或团聚体开始被风力移动 时的风速	直接指标	风速计	[69]
			Sensit 监测系统	[70]
			跃移传感器	[67]
			Safire 监测系统	[71]
输沙率	沿气流方向在单位时间内通过单位 截面的沙尘总量	直接指标	蠕移质收集槽	[72]
			BSNE 集沙仪	[73]
			MWAC 集沙仪	[74]

点造成扰动，要么需要带离土样，要么会使得监测点的地表发生改变，进而导致后续监测的风蚀可蚀性状况失真^[76]。这就使得对同一监测点进行较高时间分辨率的连续监测有很大困难。

由于土壤风蚀可蚀性的研究大都基于较小空间尺度上的风蚀过程，所以大部分的土壤风蚀可蚀性指标也都基于较小空间尺度的风蚀过程。在区域尺度上，就需要通过地貌特征、水文条件、地表反射指数等因子的空间组合来反映土壤风蚀可蚀性^[77–78]。当这些指标在度量大空间尺度的潜在沙尘来源时，要监测土壤风蚀可蚀性的动态变化就比较困难，而这一特征是沙尘运动的主要驱动因子之一^[79]。由土地管理措施引起的风蚀可蚀性的变化往往具有较短时间尺度，这期间内土壤的性质也会发生变化^[48]。由于上述原因，目前还没有较合适的风蚀可蚀性指标可在区域尺度反映较高时间分辨率的风蚀可蚀性变化。

有些指标可用于反映景观尺度土壤风蚀可蚀性的空间模式。McTainsh 等^[41]构建了土地风蚀可蚀性指

数(land erodibility index, LEI)评价不同土壤类型对风蚀的相对敏感性。LEI 评价一个区域内的土壤风蚀可蚀性时，只对完全没有植被的部分是有效的。LEI 由粉尘能量和风速计算得出，因此只代表已经发生的风蚀结果。此外，上风方向相邻区域的风蚀也会影响评价结果。因此，用它评价某一区域的土壤风蚀可蚀性时就会产生误差^[41]。

Bullard 等^[80]和 Baddock 等^[81]运用 MODIS 卫星图像确定澳大利亚中部沙尘来源区域时，在区域尺度上对沙尘源区的时空分布进行制图方面做出了有益的尝试。根据始于特定地表特征的沙尘羽流的频率，确定出遭受风蚀的位置。通过上述方法确定的沙尘源区在研究导致侵蚀事件发生的地表状况的演变时可作为热点区域。利用反映地表土壤性状(如糙度和含水量)的遥感数据可以对多个区域沙尘源区进行多点监测，从而分析土壤风蚀可蚀性空间演变的机理^[82]。这个方法提供了描述一系列土壤风蚀可蚀性时间变化和频率分布模式的基础。

4 展望

风蚀可蚀性作为土壤的一项动态特征,影响着风蚀的时空模式。充分认识风蚀可蚀性的时空变化特征是对风蚀风险评价的基础,也是目前风蚀研究亟待解决的一个问题。要实现这一目标,在现有研究的基础上,还需要在以下 3 方面继续深入:

(1) 围绕着如何确定土地管理措施和扰动对土壤风蚀可蚀性影响的定量关系。首先,要确定不同类型管理措施和扰动对于风蚀可蚀性指标(如团聚体、结皮性质、LEM 的可利用度)影响的程度,及这些变化如何影响各类土壤的风蚀可蚀性;其次,确定扰动强度如何影响土壤风蚀可蚀性的变化速率。这些研究需要克服现有监测方法的局限性,确保试验中不同类型和强度的扰动能够代表真实的田间扰动^[57];最后,要确定土表扰动发生时间和历时引起的土壤风蚀可蚀性指标变化的时间尺度,解决这个问题可以确定合适的时间间隔来监测不同环境下的土壤风蚀可蚀性的变化。例如:农业用地的耕作可以看作是单个事件的扰动,牲畜踩踏引起的牧业用地上结皮的破坏则是与时间和空间上连续的一个动态过程^[83-84]。因此,对农业用地上土壤风蚀可蚀性的监测可以是依据耕作措施进行,而牧业用地上土壤风蚀可蚀性则是持续变化的一个过程,需要更高的监测频率。

(2) 主要问题是确定气候对土壤风蚀可蚀性的影响的定量关系。这方面的研究应集中在降雨事件对土壤风蚀可蚀性的影响上,如降雨所引起地表结皮对土壤风蚀可蚀性的作用。解决这一问题需要确定降雨量如何影响不同类型土壤风蚀可蚀性,最关键的是确定引起地表结皮而将土壤风蚀可蚀性降到最小时的降雨量。

(3) 土壤风蚀可蚀性的时空变化模式在不同尺度上如何表现也是值得重视的一个方面。目前对风蚀可蚀性的研究基本上都在微观的土壤颗粒和小区的尺度上进行。而较小尺度上所得到的结论能否被应用到更大尺度上的风蚀模型中的土壤风蚀可蚀性是很重要的。此外,对不同土壤风蚀可蚀性的动态特征进行比较也将会推动土壤风蚀可蚀性对气候响应的认识。

参考文献:

- [1] Fernandez-Bernal A, Rosa MADL. Arid Environments and Wind Erosion[M]. New York: Nova Science Publishers, 2009: 1-13
- [2] 陈渭南, 董光荣, 董治宝. 中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 1994, 9(5): 6-12

- [3] 李智广. 中国水土流失现状与动态变化[J]. 中国水利, 2009 (7): 8-11
- [4] 土壤学名词审定委员会. 土壤学名词(定义版)[Z]. 北京: 科学出版社, 1998: 135
- [5] 刘宝元, 张科利, 焦菊英. 土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J]. 自然资源学报, 1999, 14(4): 345-350
- [6] Smalley IJ. Cohesion of soil particles and the intrinsic resistance of simple soil systems to wind erosion[J]. Journal of Soil Science, 1970, 21(1): 154-161
- [7] Zhang CL, Zou XY, Gong JR, Liu LY, Liu YZ. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(1): 53-59
- [8] Skidmore E, Powers D. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(6): 1 274-1 279
- [9] 刘连友, 王建华, 李小雁, 刘玉璋, 拓万权, 彭海梅. 耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定[J]. 科学通报, 1998, 43(15): 1 663-1 666
- [10] Chepil W. Properties of soil which influence wind erosion: I. The governing principle of surface roughness[J]. Soil Science, 1950, 69(2): 149-157
- [11] 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, 4(4): 1-5, 12
- [12] Zamani S, Mahmoodabadi M. Effect of particle-size distribution on wind erosion rate and soil erodibility[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59(12): 1 743-1 753
- [13] Chepil W. Properties of soil which influence wind erosion. 2. dry aggregate structure as an index of erodibility[J]. Soil Science 1950, 69: 403-414
- [14] 陈广庭. 北京平原土壤机械组成和抗风蚀能力的分析[J]. 干旱区资源与环境, 1991, 5(1): 103-113
- [15] Leys J, Koen T, McTainsh G. The effect of dry aggregation and percentage clay on sediment flux as measured by a portable field wind tunnel[J]. Soil Research, 1996, 34(6): 849-861
- [16] Pye K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Dunes[M]. 2ed ed. London: Springer Verlag, 2009: 110-113
- [17] 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
- [18] 董治宝, 陈渭南. 风沙土水分抗风蚀性研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(2): 17-23
- [19] Fécan F, Marticorena B, Bergametti G. Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas[J]. Annales Geophysicae, 1998, 17: 149-157
- [20] Aimar SB, Mendez MJ, Funk R, Buschiazzi DE. Soil properties related to potential particulate matter emissions (PM10) of sandy soils[J]. Aeolian Research, 2012, 3(4): 437-443
- [21] Li X, Zhang H. Seasonal variations in dust concentration and dust emission observed over Horqin Sandy Land area in China from December 2010 to November 2011[J]. Atmospheric Environment, 2012, 61: 56-65

- [22] Strong CL. Effects of Soil Crusts on the Erodibility of a Claypan in the Channel Country, South-West Queensland, Australia[D]. Brisbane: Griffith University, 2007
- [23] Belnap J. Biological soil crusts and wind erosion[A]// Belnap J, Lange OL. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management[M]. Berlin: Springer and Verlag, 2001: 339–347
- [24] Kohake DJ, Hagen LJ, Skidmore EL. Wind erodibility of organic soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(1): 250–257
- [25] Feng G, Sharratt B, Vaddella V. Windblown soil crust formation under light rainfall in a semiarid region[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 128(1): 91–96
- [26] Belnap J, Eldridge D. Disturbance and recovery of biological soil crusts[A]//Belnap J, Lange O. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management[M]. Berlin: Springer, 2001: 363–383
- [27] Jimenez AA, Huber-Sannwald E, Belnap J, Smart D, Arredondo MJ. Biological soil crusts exhibit a dynamic response to seasonal rain and release from grazing with implications for soil stability[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(12): 1 158–1 169
- [28] Gillette DA, Adams J, Muhs D, Kihl R. Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87(C11): 9 003–9 015
- [29] Belnap J, Phillips S, Herrick J, Johansen J. Wind erodibility of soils at Fort Irwin, California (Mojave Desert), USA, before and after trampling disturbance: Implications for land management[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(1): 75–84
- [30] Scarlett N. Soil crusts, germination and weeds—issues to consider[J]. Victorian Naturalist, 1994, 111(3): 125–130
- [31] Raupach M. Drag and drag partition on rough surfaces[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1992, 60(4): 375–395
- [32] Raupach M, Gillette D, Leys J. The effect of roughness elements on wind erosion threshold[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D2): 3 023–3 029
- [33] Wolfe SA, Nickling WG. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1993, 17(1): 50–68
- [34] Chappell A, Van Pelt S, Zobeck T, Dong Z. Estimating aerodynamic resistance of rough surfaces using angular reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(7): 1 462–1 470
- [35] 董治宝, 屈建军, 刘小平, 张伟民, 王训明. 戈壁表面阻力系数的实验研究[J]. 中国科学(D 辑:地球科学), 2001, 31(11): 953–958
- [36] 董治宝, 高尚玉, Fryrear DW. 直立植物-砾石覆盖组合措施的防风蚀作用[J]. 水土保持学报, 2000, 14(1): 7–11, 17
- [37] Zobeck TM, Popham TW. Wind erosion roughness index response to observation spacing and measurement distance[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 45(3): 311–324
- [38] 哈斯. 坝上高原土壤不可蚀性颗粒与耕作方式对风蚀的影响[J]. 中国沙漠, 1994, 14(4): 92–97
- [39] Colazo JC, Buschiazio DE. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina[J]. Geoderma, 2010, 159(1): 228–236
- [40] Moreno RG, Ivarez M, Alonso AT, Barrington S, Requejo AS. Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 98(1): 35–44
- [41] Mctainsh GH, Leys JF, Nickling WG. Wind erodibility of arid lands in the Channel Country of western Queensland, Australia[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände, 1999, 116: 113–130
- [42] Ash A, Mcivor J, Mott J, Andrew M. Building grass castles: Integrating ecology and management of Australia's tropical tallgrass rangelands[J]. The Rangeland Journal, 1997, 19(2): 123–144
- [43] Mckenna NC, Maxwell C, Rutledge C. Spatial and temporal analysis of crust deterioration under particle impact[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 60(2): 321–342
- [44] Eldridge DJ, Leys JF. Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 53(4): 457–466
- [45] Belnap J, Gillette DA. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: The influences of crust development, soil texture, and disturbance[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39(2): 133–142
- [46] Cornelis W, Gabriëls D. The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: An evaluation of selected models[J]. Sedimentology, 2003, 50(4): 771–790
- [47] Rice M, Mcewan I, Mullins C. A conceptual model of wind erosion of soil surfaces by saltating particles[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(5): 383–392
- [48] Zobeck TM. Soil properties affecting wind erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(2): 112–118
- [49] Okin G, Gillette D, Herrick J. Multi-scale controls on and consequences of aeolian processes in landscape change in arid and semi-arid environments[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65(2): 253–275
- [50] Yoder R, Zobeck T, Skidmore E, Lamb J, Lindstrom M, Merrill S, Mokma D, Popham T. Aggregate-mean diameter and wind-erodible soil predictions using dry aggregate-size distributions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 425–436
- [51] Fryrear DW. Determining soil aggregate stability with a rapid rotary sieve[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1985, 40(2): 231–233
- [52] Chepil W. Field structure of cultivated soils with special reference to erodibility by wind[J]. Soil Science Society of America Journal, 1953, 17(3): 185–190
- [53] Zobeck T, Popham T. Influence of microrelief, aggregate size, and precipitation on soil crust properties[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(2): 487–492

- [54] Potter K, Zobeck T, Hagan L. A microrelief index to estimate soil erodibility by wind[J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(1): 151–155
- [55] Saleh A. Soil roughness measurement: Chain method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 48(6): 527–529
- [56] Merrill SD. Comments on the chain method for measuring soil surface roughness: Use of the chain set[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62 (4): 1 147–1 149
- [57] Thomas AD, Dougill AJ. Spatial and temporal distribution of cyanobacterial soil crusts in the Kalahari: Implications for soil surface properties[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(1): 17–29
- [58] O'Neill A. Reflectance spectra of microphytic soil crusts in semi-arid Australia[J]. *Remote Sensing*, 1994, 15(3): 675–681
- [59] Karnieli A. Development and implementation of spectral crust index over dune sands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(6): 1 207–1 220
- [60] Dougill AJ, Thomas AD. Kalahari sand soils: Spatial heterogeneity, biological soil crusts and land degradation[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(3): 233–242
- [61] Bowker MA, Belnap J, Davidson DW, Goldstein H. Correlates of biological soil crust abundance across a continuum of spatial scales: Support for a hierarchical conceptual model[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(1): 152–163
- [62] Houser CA, Nickling WG. The factors influencing the abrasion efficiency of saltating grains on a clay crusted playa[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(5): 491–505
- [63] Chappell A, Mctainsh G, Leys J, Strong C. Using geostatistics to elucidate temporal change in the spatial variation of aeolian sediment transport[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(6): 567–585
- [64] Darke I, Neuman CMK. Field study of beach water content as a guide to wind erosion potential[J]. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24(5): 1 200–1 208
- [65] Anderson K, Croft H. Remote sensing of soil surface properties[J]. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(4): 457–473
- [66] Nickling W. The initiation of particle movement by wind[J]. *Sedimentology*, 1988, 35(3): 499–511
- [67] Spaan W, Van DAG. Wind borne particle measurements with acoustic sensors[J]. *Soil technology*, 1991, 4(1): 51–63
- [68] Van Pelt RS, Peters P, Visser S. Laboratory wind tunnel testing of three commonly used saltation impact sensors[J]. *Aeolian Research*, 2009, 1(1): 55–62
- [69] Wiggs G, Atherton R, Baird A. Thresholds of aeolian sand transport: Establishing suitable values[J]. *Sedimentology*, 2004, 51(1): 95–108
- [70] Stout JE. Simultaneous observations of the critical aeolian threshold of two surfaces[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(1): 3–16
- [71] Stout JE, Arimoto R. Threshold wind velocities for sand movement in the Mescalero Sands of southeastern New Mexico[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(11): 1 456–1 460
- [72] Fryrear D. A field dust sampler[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1986, 41(2): 117–120
- [73] Stout J, Fryrear D. Performance of a windblown-particle sampler[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(6): 2 041–2 045
- [74] Goossens D. Effect of soil crusting on the emission and transport of wind-eroded sediment: Field measurements on loamy sandy soil[J]. *Geomorphology*, 2004, 58(1): 145–160
- [75] Rice M, Mullins C, McEwan I. An analysis of soil crust strength in relation to potential abrasion by saltating particles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(9): 869–883
- [76] Chappell A, Strong C, Mctainsh G, Leys J. Detecting induced in situ erodibility of a dust-producing playa in Australia using a bi-directional soil spectral reflectance model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(4): 508–524
- [77] Zender CS, Newman D, Torres O. Spatial heterogeneity in aeolian erodibility: Uniform, topographic, geomorphic, and hydrologic hypotheses[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D17): 4 543–4 558
- [78] Koven CD, Fung I. Identifying global dust source areas using high-resolution land surface form[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D22): D22204
- [79] Gillette DA. A qualitative geophysical explanation for “hot spot” dust emitting source regions[J]. *Contributions to Atmospheric Physics*, 1999, 72: 67–78
- [80] Bullard JE, Baddock MC, Mctainsh GH, Leys J. Sub-basin scale dust source geomorphology detected using MODIS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (15): L15404
- [81] Baddock MC, Bullard JE, Bryant RG. Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(7): 1 511–1 528
- [82] Waggoner DG, Sokolik IN. Seasonal dynamics and regional features of MODIS-derived land surface characteristics in dust source regions of East Asia[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2 126–2 136
- [83] Williams WJ, Eldridge DJ, Alchin BM. Grazing and drought reduce cyanobacterial soil crusts in an Australian Acacia woodland[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(6): 1 064–1 075

Advances in Study on Soil Erodibility for Wind Erosion

NAN Ling¹, DU Ling-tong¹, ZHAN Xiu-Li²

(1 *Research Center for Western Development, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;*

2 *College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)*

Abstract: Soil erodibility for wind erosion research is one of the important aspects in aeolian erosion research and is a crucial parameter for wind erosion prediction. This paper: 1) interpreted the concept of wind erodibility of soil. 2) Reviewed the controls on soil erodibility for wind erosion from 6 aspects, including soil particle and aggregation, soil moisture, crusting, non-erodible roughness element, land management and spatial scale. 3) Classified the available wind erodibility metrics into two groups: those represent the components of wind erodibility and those represent the integrated measures of erodibility. 4) Summarized the measurement approaches of these erodibility metrics. 5) Highlighted the research prospects in the future and several hotspots needed more attention.

Key words: Soil erodibility, Wind erosion, Metrics, Measurement methods