

碳酸钙含量对土壤风蚀强度的影响

董苗^{1,2,3}, 严平^{1,2}, 孟小楠^{1,2}, 郭金蕊^{1,2}, 钱瑶^{1,2}, 吴伟^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学

地表过程与资源生态重点实验室, 北京 100875; 3. 防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 研究选取内蒙古东部的两种土壤, 经过后期的培育使土壤中的 CaCO_3 含量分别达到 0%, 2%, 5%, 8%, 10%, 通过风洞试验分析了 CaCO_3 含量与起动风速、风蚀速率之间的关系。结果表明: (1) 随着 CaCO_3 含量的增加, 土壤的起动风速呈现先增加后减小的趋势, 当土壤中的 CaCO_3 含量约为 5% 时, 起动风速达到最大; (2) 不论土壤中 CaCO_3 含量如何变化, 风蚀速率都随着风速的增大而增大, 但不同风速下, 当 CaCO_3 含量约为 5% 时, 风蚀强度最小, 风蚀强度随风速的变化趋势较平缓; (3) 风蚀速率与 CaCO_3 含量的关系符合二次函数。当碳酸钙含量约为 5% 时, 风蚀速率较小, 但由于土壤性质的差异, 两种土壤累积风蚀强度不同; (4) 将土壤中的 CaCO_3 含量控制在 5% 左右, 风速降低到 10 m/s 以下时, 对防治草原地区土壤风蚀有显著的效果。

关键词: CaCO_3 含量; 起动风速; 风蚀强度; 风洞试验

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0018-06

Effect of Calcium Carbonate on Wind Erosion

DONG Miao^{1,2,3}, YAN Ping^{1,2}, MENG Xiaonan^{1,2}, GUO Jinrui^{1,2}, QIAN Yao^{1,2}, WU Wei^{1,2}

(1. Faculty of Geographical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875,

China; 3. MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing 100875, China)

Abstract: Two types of soils from eastern Inner Mongolia, China, were selected as the research samples. Following soil cultivation, the CaCO_3 contents in the soils reached 0%, 2%, 5%, 8%, and 12%, respectively. The relationship of CaCO_3 contents with threshold wind velocity and wind erosion rates was analyzed through wind tunnel experiment and the following conclusions were obtained: (1) As CaCO_3 content increased, the threshold wind velocity for soils first increased and then decreased. The threshold wind velocity was highest when the CaCO_3 content was approximately 5%. (2) Regardless of the CaCO_3 contents in the soils, the wind erosion rate increased along with wind velocity. However, under different wind velocities, when the CaCO_3 content was approximately 5%, the wind erosion intensity was lowest. The wind erosion intensity showed a smooth variation trend in response to the variations in wind velocity. (3) The relationship between wind erosion rate and CaCO_3 content could be described by a quadratic function. When the CaCO_3 content was approximately 5%, the wind erosion rate was relatively small. However, owing to differences in soil properties, the two types of soils exhibited different cumulative wind erosion intensities. (4) Wind erosion of the soils could be remarkably reduced by maintaining the soil CaCO_3 content of around 5% and reducing the wind velocity to less than 10 m/s.

Keywords: calcium carbonate content; threshold wind velocity; wind erosion rate; wind tunnel experiment

土壤风蚀是土地沙漠化的重要组成部分和首要环节, 已成为当前全球主要的生态环境问题之一^[1-2]。

土壤风蚀是一个复杂的地球物理过程, 也是自然因素和人为因素叠加作用的综合表现^[2-3]。国内外在土壤

风蚀方面开展了大量研究,其中土壤风蚀影响因子的研究主要集中于风况、水分、植被、人类活动等^[3-8],而对 CaCO_3 的研究相对较少。在干旱、半干旱地区的土壤中 CaCO_3 普遍存在,对土壤的物理、化学、生物性状等都起着重要作用,是影响土壤风蚀的重要因子^[9-10]。研究表明,在不同质地的土壤中,不同的 CaCO_3 含量对土壤结构和抗风蚀能力影响程度不同^[11-14],一定量的 CaCO_3 可以增加黏粒和团聚体的含量,从而提高土壤抗风蚀的能力,但是过量的 CaCO_3 含量会增加易蚀部分的含量,使得土壤机械稳定性差,因此随着碳酸钙含量的增加土壤抗风蚀能力减弱^[11]。雅库波夫也认为 CaCO_3 含量高的地区比 CaCO_3 含量较低的地区更容易遭受风蚀^[15]。在美国农业部修正风蚀方程(RWEQ)中,将碳酸钙含量作为土壤可蚀性因子的一个重要因子^[16],RWEQ 中认为,风蚀速率与碳酸钙含量呈线性的负相关关系,即风蚀速率随碳酸钙含量的增加而减小^[5,6,12,13,17-21]。而在风蚀预报系统(WEPS)中并没有考虑影响土壤风蚀的 CaCO_3 因子^[22]。此后,关于 CaCO_3 与土壤风蚀的相关研究较少,没有深入研究特定的土壤类型中 CaCO_3 含量对土壤风蚀的影响,没有定量的分析土壤 CaCO_3 含量达到多少时最有利于土壤风蚀的控

制。因此本文选取内蒙古东部草原栗钙土、暗栗钙土作为研究对象,通过定量的方法探讨特定土壤类型中的 CaCO_3 含量对土壤风蚀的影响,阐明有利于防治土壤风蚀的 CaCO_3 含量阈值,以期防治草原风蚀提供重要的理论依据。

1 研究方法

1.1 样品采集和培育

在前期野外调查和测试土壤理化性质的基础上,2012 年 5 月选取表土 CaCO_3 含量接近 0 的两个土样:试样 1 和试样 2(表 1),采集表层 0—15 cm 土样约 600 kg。剔除土壤中的砾石、植物、植物根系,置于通风处晾干,晾干后过 2 mm 筛子。将样品分成五份,一份为原始样品,剩余四份添加相应的碳酸钙,使得土壤中 CaCO_3 含量分别为 0%,2%,5%,8%,12%,置于 $80\times30\times15$ cm 土箱中进行培育,定期洒水、观察,连续培育半年以上,土壤形成结构后停止洒水培育。样品培育时间逾 3 a,近似于自然状态下不同碳酸钙含量的原状土。试样 1 培育的土壤结构主要以团块状为主,土壤表层硬度与野外测试结果接近;试样 2 培育的土壤结构以团粒状为主,结构较为松散,表层有结皮,硬度与野外相比较小。

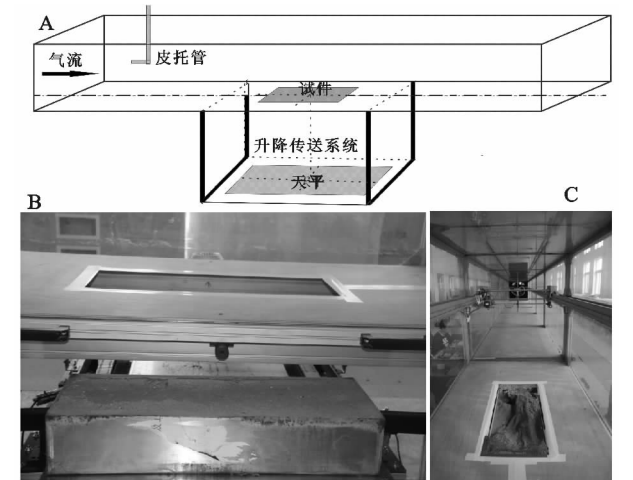
表 1 采样点理化性质

土样	土壤类型	有机质/%	CaCO_3 /%	黏粒/%	粉粒/%	砂砾/%	土壤质地
试样 1	栗钙土	0.49	0.20	10.22	5.82	83.96	壤质砂土
试样 2	暗栗钙土	2.88	0.04	10.62	12.04	77.34	砂质壤土

注:土壤质地分类依据美国制土壤质地分类三角表。

1.2 风洞模拟试验

风洞模拟试验于 2015 年 7 月在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室的中型风洞中进行(图 1)。该风洞为直流吹气式风洞,全长 34.4 m,风速 1~40 m/s 可调,试验段长 16 m,截面为 1×1 m。试验前使用快速水分测定仪(美国奥斯豪 OHAUS/MB35)检测表土含水率,将其控制在 1.0%左右;风速使用皮托管连接数字压力仪器测定。将土箱置于风洞试验段中部的试样传送升降平台,使用液压升降和履带传输系统控制土箱保持特定位置,使其表面与风洞底板齐平。试验风速依次设定为 10,15,20,25,30 m/s,前 3 个风速吹蚀时间设为 5 min,后两个风速吹蚀时间分别设为 3 min 和 2 min。试验开始时注意观察土体表面起动状况,当表层有颗粒运动时,记录为起动风速。每组试样、每个风速吹蚀前后,土箱降到平台底部的 KCC150 型电子天平(量程 150 kg,精度 1 g)上进行称重,两次差值即为吹蚀量,依次获得每个风速下的风蚀量(g),换算成风蚀速率($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)。



注:A 风洞试验布置示意图;B 升降传送平台(试样 1, CaCO_3 含量为 2%);C 试验全景(试样 2, CaCO_3 含量为 5%)。

图 1 风洞试验装置

2 结果与分析

2.1 CaCO_3 含量与起动风速的关系

不同 CaCO_3 含量的土壤起动风速不同(表 2,图

2)。当 CaCO_3 含量约为 5% 时,两组试样起动风速达到最大,试样 1 栗钙土为 10.14 m/s,试样 2 暗栗钙土为 10 m/s。当 CaCO_3 含量小于 5% 时,栗钙土起动风速随着 CaCO_3 含量的增加而增大,暗栗钙土

则是先减小后增大;当 CaCO_3 含量大于 5% 时,两组试样起动风速均随着 CaCO_3 含量的增加而减小。因此给土壤添加适量的碳酸钙使其含量达到 5% 左右,有利于提高起动风速,从而减少土壤风蚀。

表 2 土壤样品风洞试验结果

土壤类型	CaCO_3 含量/%	土壤水分/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	硬度/ 10^5 Pa	起动风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	不同风速下的风蚀速率/($\text{g} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)					
						10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s	累积
试样 1 (栗钙土)	0	0.71	1.99	2.1	7.22	0.07	0.01	5.53	18.7	83.23	12.83
	2	0.12	2.06	3.9	8.15	0.18	1.29	1.1	1.41	5.63	1.41
	5	1.20	1.97	5.5	10.14	0.03	0.1	0.21	1.18	3.51	0.61
	8	0.62	1.92	10.9	7.5	0.99	2.39	1.14	0.88	2.99	1.56
	12	0.74	1.91	4.1	5.6	0.56	1.93	1.25	2.48	4.9	1.80
试样 2 (暗栗钙土)	0	1.55	1.60	3.0	7.8	0.21	4.81	52.97	90.74	130.56	41.15
	2	1.50	1.62	2.1	7.2	0.15	16.14	41.19	61.44	84.24	32.01
	5	1.44	1.77	3.2	10.0	0.08	5.61	17.06	25.21	21.88	11.66
	8	1.56	1.53	0.0	8.9	0.38	12.68	26.19	29.56	12.78	20.35
	12	1.61	1.59	1.8	6.5	0.36	4.94	23.08	38.73	56.76	18.67

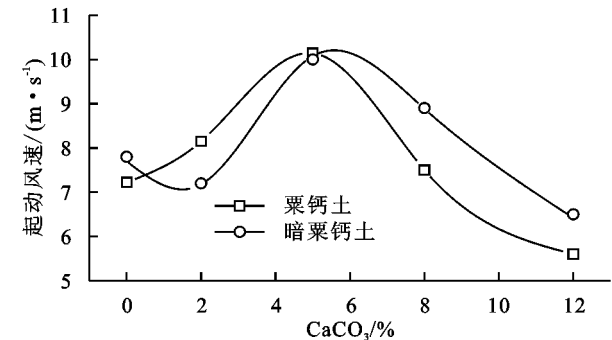


图 2 两种土壤 CaCO_3 含量与起动风速的关系

2.2 不同风速下 CaCO_3 含量与风蚀速率的关系

两组不同类型的土样在相同 CaCO_3 含量下,风蚀速率随风速增加而加大;在相同风速下,当土壤中 CaCO_3 含量为 5% 时,风蚀速率最低。不同风速下风

蚀速率随 CaCO_3 含量的变化趋势有所差异(图 3)。

试样 1 栗钙土,风速小于等于 20 m/s 时,风蚀速率随 CaCO_3 含量的变化较平稳;当风速大于 20 m/s 时,风蚀速率随 CaCO_3 含量的增加,呈现先急速下降后缓慢增加的趋势。试样 2 暗栗钙土,风速小于 20 m/s 时,风蚀速率随 CaCO_3 含量的变化波动较小,风速大于等于 20 m/s 时,风蚀速率随 CaCO_3 含量的变化呈现先降低后升高的趋势。两种类型土壤的下降趋势不同,可能是由于不同质地的土壤添加不同比例的 CaCO_3 对土壤结构和风蚀能力有不同的影响^[5-6]。两组试样不同风速水平下, CaCO_3 含量约为 5% 时风蚀速率最低,因此,当风速较大时,在土壤中添加适量的 CaCO_3 有可以显著的降低风蚀强度。

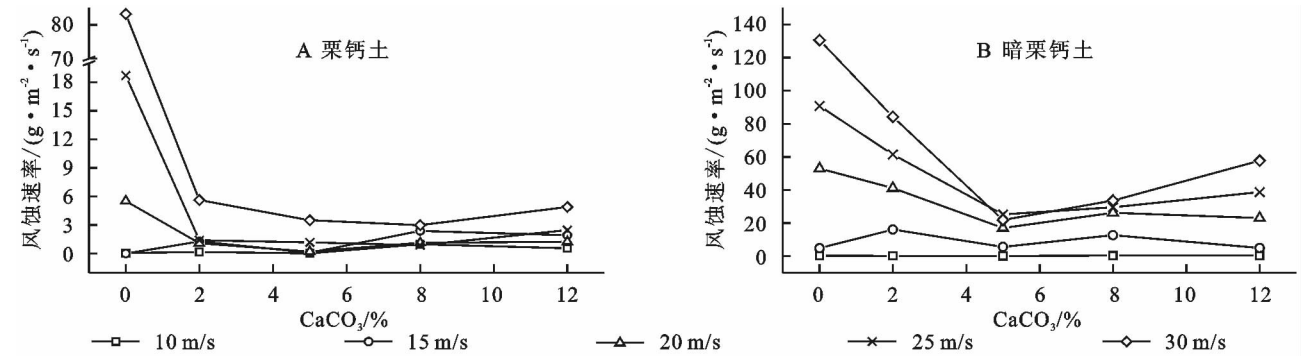


图 3 不同风速下风蚀速率随 CaCO_3 含量的变化

两组试样累积风蚀速率随 CaCO_3 含量的变化呈现陡变和缓变交替的特点(图 4),对累积风蚀速率与 CaCO_3 含量进行回归分析,两组试样 CaCO_3 含量与风蚀速率之间的关系均符合二次函数式,式中, Y 为风蚀速率,

X 为 CaCO_3 含量。对于栗钙土, $a=0.191, b=-2.927, c=10.407, R^2=0.741$;暗栗钙土, $a=0.461, b=-7.416, c=41.986, R^2=0.927$ 。从两组方程式中可以看出,当 CaCO_3 含量 X 约为 5% 时,累积风蚀速率 Y 达到最低。

2.3 不同 CaCO_3 含量下风速与风蚀速率的关系

总体上, 两组土壤风蚀速率随着风速的增加而增大(图5); 当风速为 10 m/s 时, 栗钙土、暗栗钙土的风蚀速率均最小。风速从 10 m/s 增加到 15 m/s 时, 两组土样风蚀速率缓慢上升; 当风速从 15 m/s 增加到 20 m/s 时, 风蚀速率变化较明显。对于栗钙土, 碳酸钙含量为 0 时, 风蚀速率先急速上升, 后缓慢上升, 添加了碳酸钙的土样则呈现先降低后增加的趋势。暗栗钙土, 风蚀速率随风速的增加而增加。两种类型的土样在风速 15~20 m/s 表现出不同的变化趋势, 主要是由于两种土样的土壤结构不同, 试样 1 栗钙土经过培育后土壤结构主要为团块状, 而试样 2 暗栗钙土主要为团粒状。当风速在 10~15 m/s 时, 易受风蚀的是松散且无结构或结构性差的细颗粒部分; 当风速从 15 m/s 增加到 20 m/s 时, 栗钙土团块状结构的土壤由于团聚体具有间歇性, 易被风蚀的

土壤颗粒相对减少, 暗栗钙土则土壤松散, 结构较差易于受到风蚀。当风速在 20~30 m/s 时, 由于风速增大, 会对土壤结构进一步造成破坏, 因此两种土壤类型的风蚀速率随风速的增加而增大。

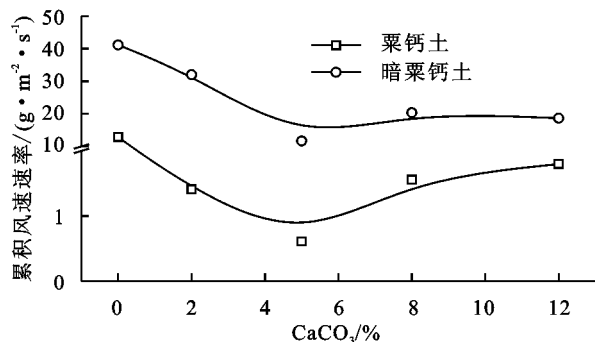


图4 累积风蚀速率随 CaCO_3 含量的变化

从图5中得出, 两种土壤当 CaCO_3 含量为 5% 时, 风蚀速率随风速的变化缓慢, 风蚀速率也最小^[14]。因此在土壤中添加 CaCO_3 , 使其含量达到约 5%, 并通过一些工程措施、生物措施等手段将栗钙土分布区域的风速降低到 10 m/s 以下, 可以有效的防治土壤的风蚀。

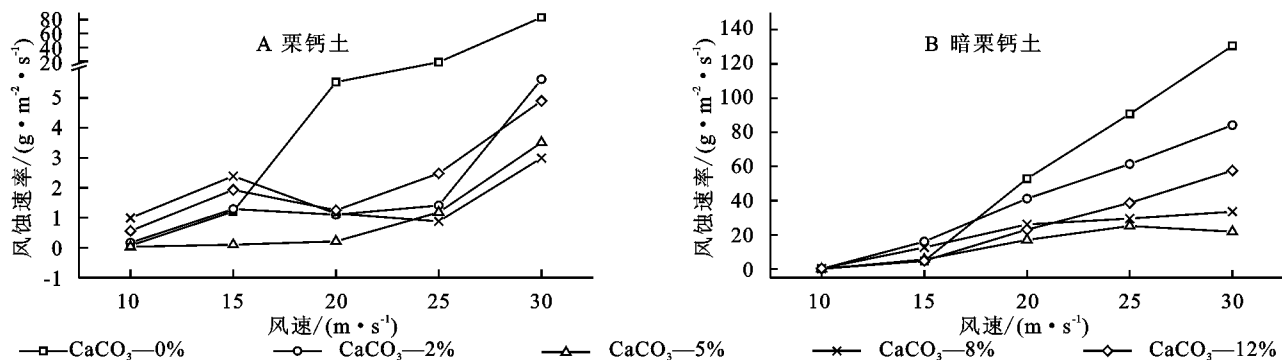


图5 不同 CaCO_3 含量风蚀速率随风速的变化

3 讨论

当土壤中的碳酸钙含量较小时, 土壤团粒形成的主要胶结物质是黏粒。土壤微小颗粒带有负电荷, 表面吸附着一定量的低价阳离子, 给土壤中添加适量的碳酸钙, 碳酸钙遇水后, 电解出来的 Ca^{2+} 与土粒周边的低价阳离子产生交换作用, 从而减少了土粒表面吸附水膜的厚度, 使得土粒间距更为接近, 分子引力随着增加, 小颗粒聚集成大颗粒, 组成一个稳定的结构从而提高了土壤的抗侵蚀力^[23-26]。当加入过量的碳酸钙时: (1) 除吸附和离子交换外, 仍然有相当部分的碳酸钙包围在土粒表面。碳酸钙颗粒与孔隙溶液接触, 发生水化, 形成一层包裹在外面的微晶或非晶 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 膜, 阻碍了颗粒的接触, 土壤之间难以形成微团聚体, 土壤力学性质反而下降^[27]。(2) 随着碳酸钙含量的增加, 破坏了土颗粒的

原始胶结, 由于碳酸钙本身占用一定的体积, 使土壤体积相对减少, 土壤的容重先减小后增加, 孔隙度、毛管孔隙度、自然含水量、田间持水量、毛管持水量、饱和持水量都出现了先增加后减小的变化趋势, 进而降低土壤水分的绝对含量, 土壤开始沙化, 土壤结构松散且结构性差, 土壤强度下降^[28-30]。(3) 碳酸钙含量的增加, 使得土壤环境呈强碱性, 不利于 CaCO_3 转化为 Ca^{2+} 的形式, 与土壤中黏粒形成团聚体^[31-33], 也不利于将土壤中的有机碳转化为无机碳, 研究表明有机碳和碳酸盐质量分数均很高的土壤, 有机碳的增加会抑制碳酸盐对土壤团聚体的作用^[34-40]。

根据前期土壤调查结果, 土壤质地为壤质砂土和砂质壤土, 物理性沙粒含量在 75% 以上。这种土壤类型大部分质地较为疏松, 透水性强而保水性较差, 再加上有机质和黏粒含量较低难以形成稳定的土壤

结构。向土壤中添加 CaCO_3 不仅直接影响土壤理化性质,也间接的影响土壤结构、土壤团聚体、土壤有机质等从而改变了土壤质地和粒径组成。不同质地的土壤添加不同比例的 CaCO_3 ,其土壤结构和土壤抗风蚀能力不同。有研究表明 CaCO_3 与细砂和粉砂有较高的相关性^[41],土壤中高 CaCO_3 含量增加了粉砂和细砂的比例,容易形成颗粒状的土壤结构,减弱了黏粒和有机质的胶结力,使土块更容易破碎,这种结构的土壤无论颗粒大小在一定条件下都会引起风蚀^[11,42-43]。这与前人的研究结果相一致^[11,15,44-45]。关于碳酸钙的具体胶结作用的大小、强度、方式等还需要今后进一步的研究。

本文通过风洞试验,探讨土壤中单一 CaCO_3 因子与土壤风蚀强度的关系,得出土壤中 CaCO_3 含量以 5% 为拐点,当 CaCO_3 含量小于 5% 时,起动风速随着 CaCO_3 含量的减少而降低,风蚀速率随着 CaCO_3 含量的减少而增加;当 CaCO_3 含量大于 5% 时,起动风速随着 CaCO_3 含量的增加反而降低,风蚀速率随着 CaCO_3 含量的增加而增加。回归分析得出碳酸钙含量与风蚀速率之间呈非线性的二次函数关系,而不是 RWEQ 中的简单线性关系^[8],采用此模型,可能产生过高的估计,郭金蕊在研究中假设其他因子相同的条件下,采用 RWEQ 模型评估出来的土壤风蚀速率可能达到实测值的 1.02~3.65 倍^[21]。

由于本文仅对两种类型土壤通过培育进行研究和比较,目前还不能对 RWEQ 风蚀模型进行充分的修订。风洞模拟试验与野外实际情况有一定的差异,土壤样品的培育完全达不到野外环境,所以原状土与培育土的结果有一定差异,能否将风洞模拟试验结果应用到实际当中, CaCO_3 因子的风蚀防治措施在实际工作中是否具有适用性和可行性还需要进一步的验证。

4 结论

从 CaCO_3 含量与起动风速、风蚀速率的分析可以看出,当 CaCO_3 含量小于 5% 时,起动风速随着 CaCO_3 含量的减少而降低,风蚀速率随着 CaCO_3 含量的减少而增加;当 CaCO_3 含量大于 5% 时,起动风速随着 CaCO_3 含量的增加反而降低,风蚀速率随着 CaCO_3 含量的增加而增加。两种栗钙土,不论 CaCO_3 含量如何变化、土壤质地有何差异,风蚀速率随着风速的增大而增大,一定程度上,风蚀强度与风速大小密切相关。但当土壤中 CaCO_3 含量约为 5% 时,风蚀速率随风速的变化较其他含量下变化平稳,

风蚀量最小。栗钙土和暗栗钙土的累积风蚀强度随 CaCO_3 含量的变化均呈现出非线性的二次函数关系,累计风蚀速率先减少再增加,这与 RWEQ 中的简单线性关系不相一致。不同碳酸钙含量下,当风速小于 10 m/s 时,风蚀强度最小,因此在北方草原地区,通过生物措施、化学措施、工程措施等手段降低风速,为土壤中添加适量的碳酸钙,使其含量达到约 5% 时,能够有效的缓减该区土壤风蚀。

参考文献:

- [1] 林艺,李和平,肖波. 东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J]. 水土保持学报,2017,31(4):44-50.
- [2] 武志涛,马志婷,郭未旭,等. 晋北沙漠化地区土壤风蚀动态及防治效果[J]. 水土保持通报,2016,36(6):8-14.
- [3] 宋胜明,刘霞,张荣华,等. 黄泛风沙区耕地土壤风蚀影响因子的通径分析[J]. 水土保持通报,2017,37(3):249-253.
- [4] Chepil W S. Properties of soil which influence wind erosion; IV. state of dry aggregate structure [J]. Soil Science, 1951,72(5):387-402.
- [5] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: I Soil texture [J]. Soil Science, 1953,75(6):473-484.
- [6] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: II Water-Stable Structure [J]. Soil Science, 1953,76(5):389-400.
- [7] 申陆,田美荣,高吉喜. 基于 RWEQ 模型的浑善达克沙漠化防治生态功能区土壤风蚀与主要影响因子分析[J]. 水土保持研究,2016,23(6):90-97.
- [8] 邹学勇,张春来,程宏,等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展,2014,29(8):875-889.
- [9] 王子龙,胡斐南,赵勇钢,等. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(5):331-336.
- [10] Gile L H, Peterson F F, Grossman R B. The K Horizon: A master soil horizon of carbonate accumulation [J]. Soil Science, 1965,99(2):74-82.
- [11] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: III. calcium carbonate and decomposed organic matter [J]. Soil Science, 1954,77(6):473-480.
- [12] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: IV. Sand, Silt, and Clay [J]. Soil Science, 1955,80(2):155-162.
- [13] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: V. Organic Matter at Various Stages of Decomposition [J]. Soil Science, 1955,

- 80(5):413-421.
- [14] Chepil W S. Influence of moisture on erodibility of soil by wind [J]. Soil Science Society of America Journal, 1956,20(2):288-292.
- [15] T·Φ·雅库波夫著,梁式弘译. 土壤风蚀及其防治 [M]. 北京:农业出版社,1956:3-47.
- [16] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, et al. RWEQ:improved wind erosion technology [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2000,55(2):183-189.
- [17] 姬生勋,刘玉涛,董智,等. 黄泛平原风沙区不同造林年限林地土壤风蚀与理化性质的变化[J]. 水土保持研究,2011,18(3):158-161.
- [18] 南岭,杜灵通,展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展[J]. 土壤,2014,46(2):204-211.
- [19] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [20] 杨钦,郭中领,王仁德,等. 河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.
- [21] 郭金蕊. 草原栗钙土 CaCO_3 含量对风蚀影响的试验研究[D]. 北京:北京师范大学,2013.
- [22] Tatarko J, Sporcic M A, Skidmore E L. A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture prior to the Wind Erosion Prediction System [J]. Aeolian Research, 2013, 10(13):3-8.
- [23] Arabi M, Wild S. Microstructural development in cured soil-lime composites [J]. Journal of Materials Science, 1986,21(2):497-503.
- [24] Bell F G. Cement stabilization and clay soils, with examples [J]. Environmental & Engineering Geoscience, 1995,1(2):139-151.
- [25] Wild S, Arabi M, Lengwards G. Soil lime reaction and microstructural development elevated temperatures [J]. Clay Minerals, 1986,21(3):279-292.
- [26] Wild S, Arabi M, Rowlands G O. Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay-lime systems [J]. Metal Science Journal, 1987,3(12):1005-1011.
- [27] Diamond S, Kinter E B. Mechanism of soil-lime stabilization [J]. Public Roads, 1965,33(12):260-265.
- [28] 和博. 石灰对土壤的影响研究[D]. 河北保定:河北农业大学,2010.
- [29] 李丹,王道泽,赵玲玲,等. 不同土壤改良剂对设施蔬菜土壤酸化的改良效果研究[J]. 中国农学通报,2017,33(27):112-116.
- [30] 张凯乐. 探究酸性土壤 pH 值与碳氮矿化之间的相互关系[D]. 浙江杭州:浙江大学,2017.
- [31] 卜巧珍. 生物炭对石灰土理化性质和作物生长的影响[D]. 广西桂林:广西师范大学,2014.
- [32] 胡乐宁,苏以荣,何寻阳. 桂西北喀斯特地区典型土壤在不同筛分强度下团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报,2014,34(3):236-241.
- [33] 倡国涵,王毅,徐大兵,等. 不同施肥结构对酸性黄棕壤修复效果研究[J]. 土壤,2016,48(4):714-719.
- [34] Clough A, Skjemstad J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate [J]. Soil Research, 2000,38(5):1005-1016.
- [35] 李富程,张建辉. 碳酸钙对石灰性土壤颗粒组成测定的影响[J]. 土壤通报,2013,44(1):191-196.
- [36] 李品芳,白海峰,郭世文,等. 栗钙土碳酸钙含量的空间分布特征[J]. 土壤学报,2014,51(2):402-406.
- [37] 张耀方,赵世伟,王子龙,等. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J]. 中国水土保持科学,2015,13(5):145-150.
- [38] 刘粮. 石灰在土壤酸化治理中的应用技术研究[J]. 现代农业科技,2016(7):224-226.
- [39] 史红平. 关中农田土壤钙素状况及其退化特征研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [40] 代允超. 石灰和有机物料对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [41] 郭玉文,王淑红,张玉龙,等. 黄土高原灌溉农田土壤团粒与碳酸钙关系研究[J]. 深圳大学学报:理工版,2008,25(3):314-319.
- [42] 王小云. 土壤团聚体与土壤侵蚀关系研究进展[J]. 安徽农业科学,2016,44(23):106-108.
- [43] Thompson L M. Soils and soil fertility [M]. New York:Mcgraw-Hill, 1957.
- [44] Wang L, Shi Z H, Wu G L, et al. Freeze/thaw and soil moisture effects on wind erosion [J]. Geomorphology, 2014,207(3):141-148.
- [45] Arimori M, Endo Y, Kobayashi T. Effect of wind and soil moisture on the wind-drift caused by wind erosion [J]. Recueil Des Travaux Chimiques Des Pays-Bas, 2010,53(7):598-606.