

羧甲基纤维素、膨润土改良风沙土崩解特性研究

章博涛, 李凯*, 杨博文, 张方祺

青岛理工大学理学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年4月10日; 录用日期: 2024年6月27日; 发布日期: 2024年7月5日

摘要

在全球变暖的背景下,中国西北地区极端降水呈现上升趋势,严重影响了风沙土的抗崩解能力,加重了该区域的土壤侵蚀问题。为提高风沙土抗崩解特性,采用羧甲基纤维素(CMC)、膨润土对风沙土进行改良,并开展相应的改良风沙土崩解试验,研究不同改良方案下风沙土的抗崩解性,结合扫描电镜试验分析改良风沙土的崩解机理。研究结果表明,土样的崩解破坏过程可分为吸水剥落阶段、孔隙崩解阶段、饱和崩解阶段、残余崩解阶段,未改良土样的吸水剥落阶段持续时间短,无明显残余崩解阶段。随着土样改良剂质量占比的提升,改良土样的吸水剥落阶段延长,崩解速率降低,抗崩解特性增强,其中CMC与膨润土的复合改良方案效果最佳。在微观结构方面,CMC、膨润土主要通过土粒团聚、粒间胶结、孔隙填充三个方面增强土样的抗崩解特性,并且CMC与膨润土改良效果可以相互促进,有效增强风沙土抗崩解特性。

关键词

土壤改良, 抗崩解特性, 风沙土, 微观结构

Study on Disintegration Characteristics of Aeolian Soil Modified by Carboxymethyl Cellulose and Bentonite

Botao Zhang, Kai Li*, Bowen Yang, Fangqi Zhang

School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

Received: Apr. 10th, 2024; accepted: Jun. 27th, 2024; published: Jul. 5th, 2024

*通讯作者。

Abstract

Under the background of global warming, extreme precipitation in Northwest China shows a rising trend, which seriously affects the disintegration resistance of aeolian soil and aggravates the soil erosion problem. In order to improve the disintegration resistance characteristics of the aeolian soil, carboxymethyl cellulose (CMC) and bentonite were used to improve the aeolian soil, the corresponding disintegration test of the improved aeolian soil was carried out to study the disintegration resistance of aeolian soil under different improvement schemes, and the disintegration mechanism of the improved aeolian soil was analyzed in combination with scanning electron microscope (SEM) test. The results show that the disintegration damage process of soil samples can be divided into surface water absorption and spalling, saturating and softening, saturated stabilization, and complete disintegration. Unimproved soil samples have a shorter duration of the absorptive spalling phase and complete disintegration. With the increase in the proportion of the quality of the soil sample ameliorant, the absorptive spalling stage of the amended soil samples is prolonged, the disintegration rate is reduced, the disintegration characteristics of the soil samples are strengthened, and the composite improvement scheme of CMC and bentonite is the best. In terms of microstructure, CMC and bentonite mainly enhance the disintegration resistance of soil samples through soil particle agglomeration, intergranular cementation, and pore filling, and CMC and bentonite can promote each other's improvement effect, effectively enhancing the disintegration resistance of aeolian soil.

Keywords

Soil Improvement, Disintegration Characteristics, Aeolian Soil, Microstructure

Copyright © 2024 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

风沙土在我国西北和北部地区分布广泛，由于特殊的地理位置、气候环境以及地质运动等因素共同作用，风沙土的矿物成分与土壤结构较为特殊[1] [2]。长期恶劣环境的风化作用导致风沙土土壤结构性差，颗粒松散无胶结[3]。我国西北和北部地区处于干旱与半干旱的温带大陆性季风气候区域，但由于全球变暖等原因，导致近年来极端天气频发，强降水事件日趋增多[4]，受极端天气影响，风沙土遇水易崩解破坏，发生水土流失、浅层滑坡、穿沙公路路基失稳等问题。

风沙土的改良研究由沥青拌沙、麦草固沙等方向向着生态修复与环境友好方向不断推进[5] [6]。近年来，羧甲基纤维素(CMC)与膨润土作为土壤改良剂因其效果稳定、环境友好、施用简单等优点受到广泛关注。朱力君等[7]使用 CMC 高分子材料改良黄土，发现改良后的黄土具有更强的持水性能。喜银巧等[8]通过对 CMC、膨润土等三种土壤改良剂改良沙土进行直剪试验，研究了沙土抗风蚀能力的抗剪强度指标。Yi 等[9]研究表明，CMC 可以约束沙土颗粒，并将其称为沙子“土壤化”。Zhou 等[10]研究发现，膨润土改良土壤可以使土壤微生物群落功能与基因多样性得到提高。目前风沙土崩解特性改良试验研究较少，且改良剂较为单一。本文利用自制的崩解测试仪，对 CMC、膨润土改良风沙土进行室内崩解试验，结合 SEM 扫描电镜试验，观察改良土样的微观结构特性变化，研究不同质量占比的 CMC、膨润土单独与复合改良对风沙土抗崩解性的影响规律，分析并比较不同方案的改良效果与改良机理，以期为实际工

程中的风沙土改良提供理论依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

试验风沙土取自内蒙古库布齐沙漠，库布齐沙漠主要位于内蒙古鄂尔多斯杭锦旗(东经 $107^{\circ}01' \sim 111^{\circ}30'$, 北纬 $37^{\circ}30' \sim 40^{\circ}41'$) (见图 1)。黄河中游南岸紧邻库布齐沙漠北部，干旱与半干旱区域交界线贯穿库布齐沙漠，导致其气候受季风影响明显[11]。夏季受气温、降水等因素影响，形成数条季节性河流汇入黄河。由于风沙土土壤结构性差，极易发生崩解导致水土流失，提高黄河泥沙含量[12]。

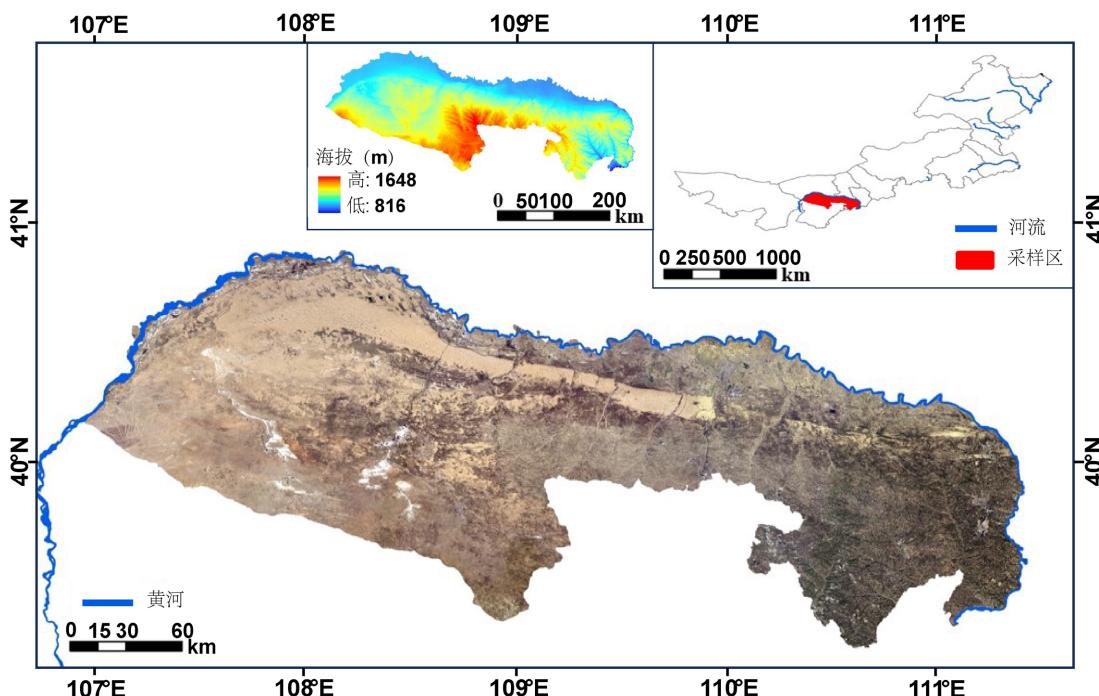


Figure 1. Overview of soil sampling areas

图 1. 土样采集区概况

2.2. 试验材料

风沙土采用四分法随机取样，取样深度为 0~25 cm，过 2 mm 孔径筛，混合均匀后备用。风沙土土体松散，颗粒间无明显胶结，矿物成分以石英、斜长石为主[13]。风沙土土颗粒中砂粒($d > 0.05$ mm)含量高。羧甲基纤维素(CMC)为白色的粉末颗粒，由天然纤维素化学改性制得，无害无味，其具有亲水基团羟基(-OH)和羧基(-COOH)，易溶于水形成透明黏性胶体。膨润土矿物成分以蒙脱石为主，颗粒细小，具有较大的比表面积和很强的吸湿性[3] [14]。

2.3. 试验方法

改良风沙土崩解特性研究主要包括改良土样制备、崩解试验、微观结构三部分，试验流程与设备见图 2，具体试验方法如下。

1) 试样制备。将未改良风沙土标记为 CK，作为对照试验。综合考虑 CMC 与膨润土改良的经济性与可行性，选择 CMC、膨润土分别单独改良与复合改良三种改良方案。由于 CMC 成本较高，CMC 改良

土样质量占比选择 0.5%、1%、2%，标记为 C1、C2、C3；膨润土成本低，改良质量占比选择 5%、10%、20%，标记为 B1、B2、B3；复合改良比例选择 0.5% + 5%、1% + 10%、2% + 20%，标记为 CB1、CB2、CB3。将过筛后备用土样，掺入不同质量占比的改良剂，取一定量的水充分拌合均匀，密封静置闷料 12 h，制备直径 61.8 mm、高度 40 mm 的土样。

2) 崩解试验。试验采用自主搭建的崩解装置进行，装置中金属格网孔眼为《土工试验标准》规定的 1 cm^2 大小。为了减小土样在崩解过程中水分入渗并排出孔隙中空气产生的影响，设置金属格网下端加装收集底板的对照组。试验组与对照组同时制样并进行崩解实验，保证试验条件相同。加装的收集底板应与金属格网留足空隙，防止影响土样下方水体的崩解作用。引入对照组后，排除水分入渗排出空气的影响后计算土样崩解率 A_t ：

$$A_t = \frac{m_0 - (m_t - (m_0 - m_b))}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中， m_0 为土样被水完全淹没时测力计读数，g； m_t 为试验组 t 时刻测力计读数，g； m_b 为对照组 t 时刻测力计读数，g。

土样崩解速率 V_t 按照式(2)计算如下：

$$V_t = \frac{A_i - A_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \quad (2)$$

式中， A_i 、 A_{i+1} 为土样 i 、 $i+1$ 时刻土样崩解率； t_i 、 t_{i+1} 为土样 i 、 $i+1$ 为数据采集时间。

3) 微观结构试验。土体崩解破坏的主要因素为土体孔隙结构与颗粒胶结情况等[15] [16]。为了进一步研究改良风沙土的崩解特性，采用日立 TM4000 扫描电镜进行 SEM 试验。从微观结构角度解释其崩解机理，研究不同改良方案对其崩解特性的影响规律。

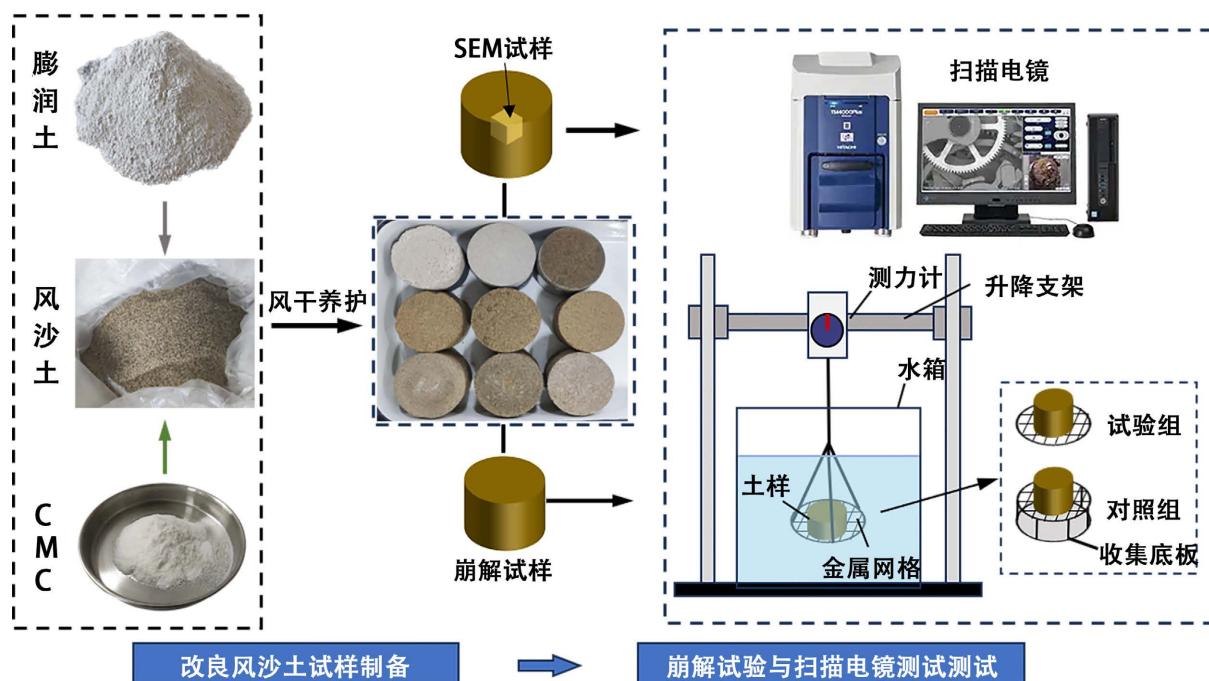


Figure 2. Test process and equipment

图 2. 试验流程及设备

3. 试验结果分析

3.1. 崩解形态分析

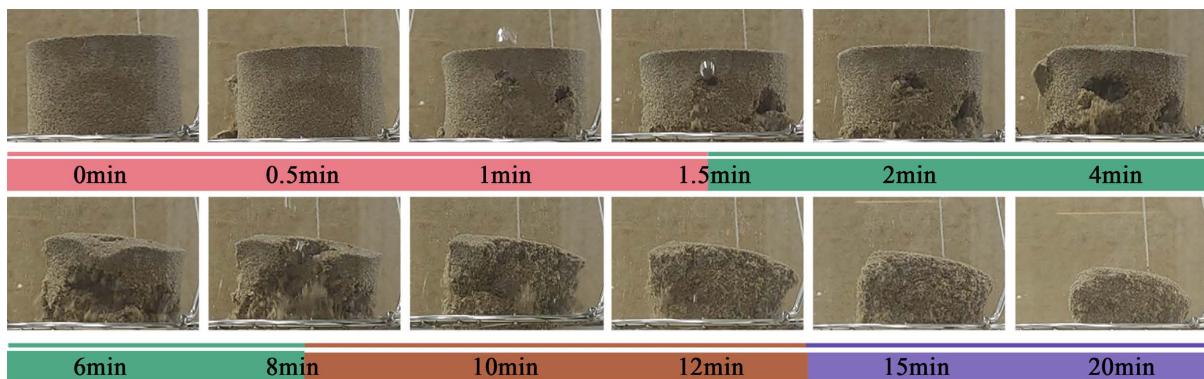


Figure 3. Soil disintegration patterns

图 3. 土样崩解形态

土样在水的浸润作用下，土体颗粒间水膜厚度增加，粒间胶结逐渐失效，导致土颗粒剥离，土体逐渐崩解。风沙土崩解模式可由崩解形态直观地表现出来。选取具有代表性的 CB3 土样研究其崩解形态变化，图 3 为相机记录的崩解形态图像。崩解试验中土样大多从边缘开始崩解，土样的崩解试验前期，土样接触水瞬间便开始崩解，随着水分渗入土样表面不断有气泡排出，土样表面与边缘位置出现颗粒或小块土样剥落。1.5 min 后土样开始出现大块崩解，部分空气伴随着大块崩解掉落瞬时排出。随着土样崩解持续进行，8 min 后鲜有气泡出现，土体以颗粒或小团聚体为主持续稳定崩解。持续稳定崩解状态持续至 15 min 左右，土体崩解开始减缓，未崩解土体无明显棱角，表面圆滑。

3.2. 崩解率曲线分析

为了更加直观、准确地描述土样崩解特征，通过绘制崩解率 - 时间关系曲线表述土样的抗崩解特性，典型的崩解率 - 时间关系曲线一般呈“S”型[16]，见图 4。

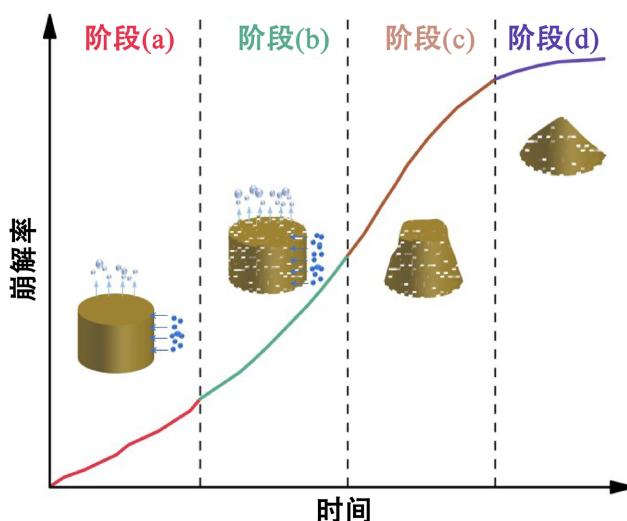


Figure 4. Disintegration-time relationship curve

图 4. 崩解 - 时间关系曲线

根据土样崩解形态可以将崩解-时间关系曲线划分为4个阶段：阶段(a)土样崩解速率较小，土样在崩解过程初期，水分渗入并伴着土体内部空气排出。这个过程中土体未发生明显崩解，仅土样表面出现细小剥落。随着水分入渗，部分土颗粒矿物吸水膨胀以及粒间胶结物质流失等因素土样内部裂隙逐渐发育。将阶段(a)称为吸水剥落阶段；阶段(b)土体呈块状、片状或大量粉状剥落，由于土样崩解速率较大，导致水体较为浑浊。土体内部由于水分逐渐入渗饱和度增加，但由于土体内部孔隙大小不均匀，较大的孔隙先被水体填充，细小的孔隙内部空气无法排除并压缩，孔隙封闭导致气压增加，产生应力集中。土体内部裂隙沿细小孔隙迅速发育，导致大范围崩解，同时封闭孔隙内气体瞬时释放，导致水体浑浊，该阶段(b)可称为孔隙崩解阶段；随着崩解持续进行，土样内部空气基本排出，土样逐渐达到饱和。此阶段土颗粒呈流沙状均匀剥落，土体崩解速率逐渐变慢，不会发生大范围崩解，该阶段(c)可称为饱和崩解阶段；崩解过程接近尾声，土样完全松散解体，失去结构强度，粒间胶结物质完全流失，该阶段(d)可称为残余崩解阶段。

3.3. 崩解试验结果

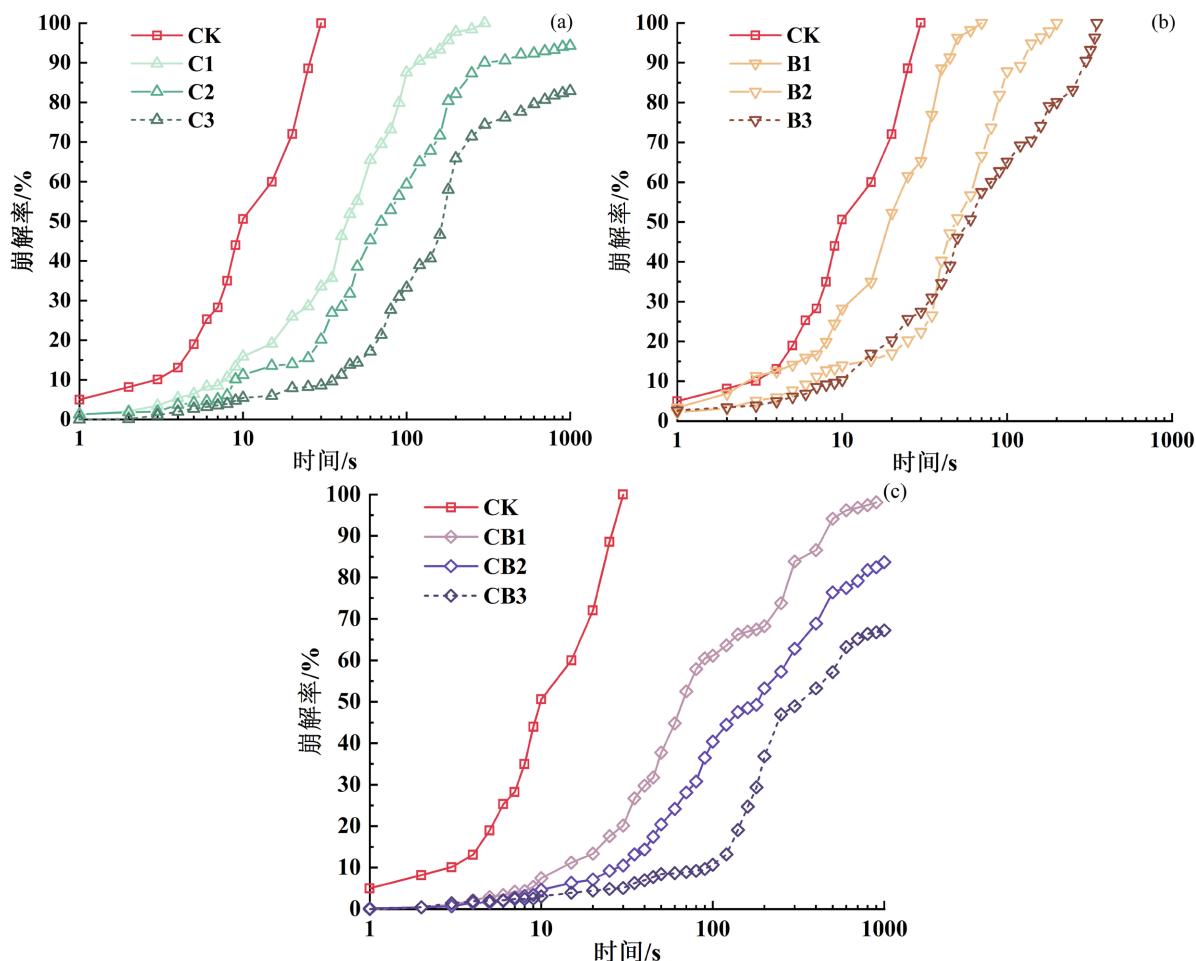


Figure 5. Disintegration-time relationship curves for soils with different improvement methods (a) CMC, (b) bentonite, and (c) composite improved aeolian soil samples

图 5. 不同改良方案(a) CMC、(b)膨润土、(c)复合改良风沙土土样崩解率 - 时间关系曲线

以未改良风沙土土样为对照组，研究不同质量占比 CMC、膨润土与两者复合改良风沙土抗崩解特性

的影响。根据崩解试验数据绘制崩解率 - 时间关系曲线, 如图 5 所示。

从图 5 中的各组土样的崩解率 - 时间关系曲线可以明显地发现, 未改良土样未出现残余崩解阶段, 即未改良土样在崩解过程中持续快速崩解, 崩解后无残余, 土样在饱和崩解阶段即崩解完全。其余改良试样的崩解率 - 时间曲线均不同程度地呈现出完整的典型曲线, 可直观地划分出四个不同的崩解阶段, 表明改良后土样的抗崩解特性提升显著。土体崩解后期出现残余崩解阶段, 土体崩解后的残余部分可在水体中保持较长时间的稳定状态。

改良土样吸水剥落阶段持续时间是土样浸入水后可以保持土样基本形态的界限, 崩解率为土样的崩解速率, 通过对比这两个抗崩解特性指标可以直观地反映出不同改良方案土样抗崩解性能的优劣。图 6(a)、图 6(b)为不同改良方案的吸水剥落阶段持续时间和崩解率分别利用一次函数($T = a * x_{C/B} + b$)与指数函数($V_t = a * e^{(-b * x_{C/B})} + c$)拟合的结果, 拟合结果 R^2 均>0.95。通过函数拟合后, 复合改良拟合函数曲线可分别投影到单独改良函数同一平面内进行对比分析。

观察图 6 中不同改良方案函数拟合结果, 一次函数截距 b 和指数函数中参数 a 、 c 均无明显差别且参数变化对函数曲线趋势影响较小, 所以对一次函数的斜率 a 与指数函数的指数系数 b 进行对比分析。复合改良后一次函数拟合斜率较 CMC、膨润土单独改良提升显著, 较 CMC、膨润土单独改良提升 40.65%、286.79%。崩解率方面, 复合改良后拟合函数的指数系数较 CMC 单独改良提升 66.74%, 较膨润土到单独改良提升 307.99%。通过对分析吸水剥落阶段持续时间与崩解率两个抗崩解特性指标拟合函数的参数, 可以发现三种改良方案随着改良剂含量的提升, 土样的抗崩解性能均逐渐提升。三种改良方案中复合改良的抗崩解特性效果最佳。

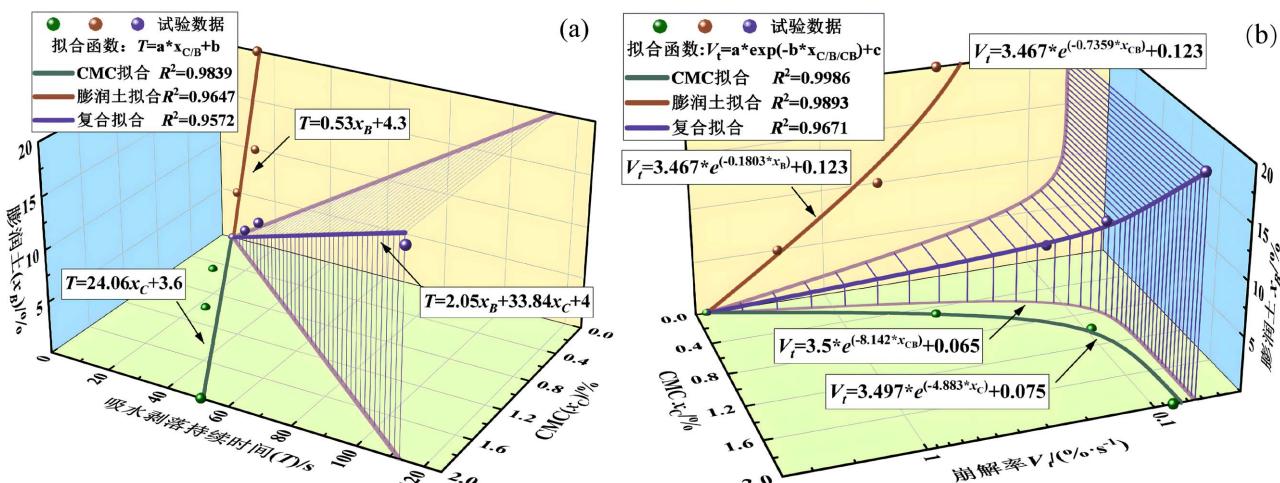


Figure 6. Different improvement methods (a) duration time of water absorption and flaking phase and (b) disintegration rate fitting results

图 6. 不同改良方案(a)吸水剥落阶段持续时间、(b)崩解率拟合结果

4. 微观结构及机理分析

未改良风沙土颗粒粒间胶结松散, 土体孔隙较多, 大孔隙较多。对于未改良土样, 当土样浸水后, 水分入渗填充土样孔隙, 由于水的浸润作用, 土体逐渐崩解, 土壤颗粒逐渐分离, 直至土样完全崩解。

对于改良风沙土土样, 膨润土填充于土体孔隙间, 使得土样孔隙直径减小, 阻碍了水分渗入土样, 使得膨润土改良土样较未改良土样拥有更长的吸水剥落阶段。CMC 胶结土壤颗粒, 使得松散的风沙土粒间黏聚力增强, 颗粒粒间胶结失效时间延长。随着崩解进行, 土样体积减小到一定程度后, CMC 的胶结

作用可以保持土体残余部分的整体性，使得土样基本保持稳定。

对于 CMC、膨润土复合改良土样根据 SEM 图像建立改良风沙土崩解微观结构模型，见图 7。CMC 与膨润土通过土粒团聚、粒间胶结、孔隙填充等方式增强风沙土的抗崩解能力。

1) 土粒团聚，膨润土颗粒由于自身具有黏性，改良土样中膨润土颗粒部分自行团聚，部分黏附于风沙土颗粒上。CMC 对团聚土体颗粒进行包裹，加强了土粒团聚。当土样被水浸润后，未团聚颗粒由于水的浸润作用崩解分离，团聚土粒可以有效保持其团聚状态，降低崩解率。

2) 粒间胶结，CMC 具有羟基(-OH)与羧基(-COOH)两种亲水基团，可以相互交联，将松散的风沙土颗粒胶结，增强土体黏聚力，形成结构稳定的土体结构，有效减弱水的浸润作用，抵抗水体在粒间形成水膜分割土粒，以此来提升土样抗崩解特性。膨润土自身具有一定的黏性，可以与 CMC 共同作用使得土粒团聚体之间相互胶结，减小土粒与水的接触面积，抵抗水的浸润作用。

3) 孔隙填充，复合改良后 CMC 促进膨润土黏粒相互胶结，形成黏粒团聚体，将粒间孔隙进行填充，使得土体孔径减小，减弱水侵入土体的速度。并且部分黏粒团聚体与其他黏土团聚体或沙土颗粒团聚形成内部具有封闭孔隙的大型团聚体，也可以有效抵抗水分渗入，提升抗崩解性能。

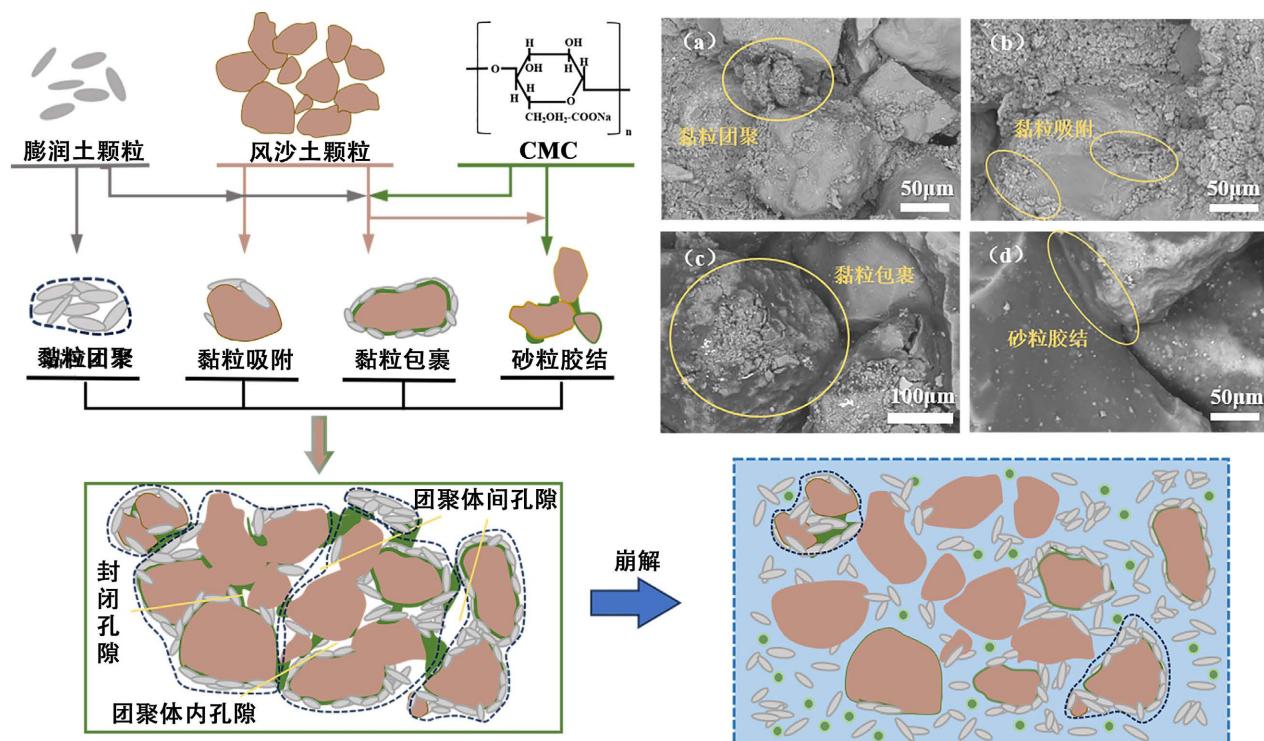


Figure 7. Microstructural model of disintegration in improved aeolian soil

图 7. 改良风沙土崩解微观结构模型

5. 结论

通过对 CMC、膨润土以及两者复合改良风沙土开展崩解试验，分析不同改良土样崩解率 - 时间关系曲线与崩解形态，并结合 SEM 试验对微观结构开展崩解机理分析，主要得到以下结论：

- 1) 土样崩解破坏过程可分为吸水剥落阶段、孔隙崩解阶段、饱和崩解阶段、残余崩解阶段，对于部分土样尤其是未改良土样，吸水剥落阶段与残余崩解阶段相对不明显。
- 2) 风沙土经过 CMC、膨润土改良后，抗崩解特性明显提升，随着改良剂含量的提升，改良风沙土

吸水剥离阶段时间显著增加，崩解速率减缓。复合改良风沙土抗崩解特性较相同质量占比下 CMC、膨润土单独改良风沙土抗崩解特性强。

3) CMC、膨润土主要通过土粒团聚、粒间胶结、孔隙填充三个方面增强土样的抗崩解特性，并且 CMC 与膨润土改良效果可以相互促进，有效增强风沙土抗崩解特性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 崔桂鹏, 肖春蕾, 雷加强, 等. 大国治理: 中国荒漠化防治的战略选择与未来愿景[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 943-955.
- [3] 马海于, 李诚志. 膨润土添加对沙土持水能力的改善[J]. 中国农村水利水电, 2022(12): 143-149.
- [4] Lu, S., Hu, Z., Yu, H., Fan, W., Fu, C. and Wu, D. (2021) Changes of Extreme Precipitation and Its Associated Mechanisms in Northwest China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **38**, 1665-1681. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0409-3>
- [5] 赵鹏, 黄占斌, 任忠秀, 等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(6): 618-625.
- [6] 李赟, 刘迪, 范如芹, 等. 土壤改良剂的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(10): 63-69.
- [7] 朱利君, 裴向军, 张晓超, 等. 双聚材料改良黄土持水性及生态效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 158-166.
- [8] 喜银巧, 赵英, 李生宇. 三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1401-1410.
- [9] Yi, Z., Wang, M. and Zhao, C. (2022) Desert Soilization: The Concept and Practice of Making Deserts Bloom. *The Innovation*, **3**, Article ID: 100200. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100200>
- [10] Zhou, L., Monreal, C.M., Xu, S., McLaughlin, N.B., Zhang, H., Hao, G., et al. (2019) Effect of Bentonite-Humic Acid Application on the Improvement of Soil Structure and Maize Yield in a Sandy Soil of a Semi-Arid Region. *Geoderma*, **338**, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.014>
- [11] Dang, X., Na, Y., Chi, W., Zhao, J., Zhao, Y., Wang, Y., et al. (2022) Spatio-Temporal Evolution of Sandy Land and Its Impact on Soil Wind Erosion in the Kubuqi Desert in Recent 30 Years. *Frontiers in Environmental Science*, **10**, Article 950196. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.950196>
- [12] 杜鹤强, 薛娴, 王涛, 等. 1986-2013 年黄河宁蒙河段风蚀模数与风沙入河量估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 142-151.
- [13] 田世民, 袁榆梁, 李锦荣, 等. 沙漠矿物组成与生态修复的互馈关系研究[J]. 水利学报, 2020, 51(4): 410-420.
- [14] 周春生, 龚萍, 刘伟, 等. 改性膨润土对沙地土壤改良及紫花苜蓿生物效应的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 16-22.
- [15] 卢毅, 赵洪岩, 蔡田露, 等. 生物胶改良黏土抗崩解特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 64-71.
- [16] 汤连生, 许瀚升, 刘其鑫, 等. 改良花岗岩残积土崩解特性试验研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 75-87.