

DOI: 10.11766/trxb202408300349

CSTR: 32215.14.trxb202408300349

孙豫梁, 李琪瑞, 李玮, 王祥, 商建英. 不同有机物料对盐碱土胶体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2026, 63 (3): 778–790.

SUN Yuliang, LI Qirui, LI Wei, WANG Xiang, SHANG Jianying. Effects of Different Organic Materials on the Stability of Saline-alkali Soil Colloid[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (3): 778–790.

## 不同有机物料对盐碱土胶体稳定性的影响\*

孙豫梁<sup>1</sup>, 李琪瑞<sup>1</sup>, 李 玮<sup>1</sup>, 王 祥<sup>1, 2</sup>, 商建英<sup>1, 2†</sup>

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2. 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193)

**摘 要:** 土壤胶体稳定性在土壤养分保持、结构形成和作物生长中起着重要作用。施用有机物料是改良盐碱土的有效措施, 但有机物料施入盐碱土后对土壤胶体稳定性的影响尚不清楚。通过室内土壤培养和胶体稳定性实验, 探究生物炭 (BC)、牛粪 (CM) 和玉米秸秆 (MS) 对不同盐碱程度土壤 (非盐碱土、轻度盐碱土和中度盐碱土) 胶体稳定性的影响。研究结果表明: (1) 添加有机物料显著降低盐碱土胶体直径, 使其与非盐碱土胶体颗粒相近。轻度盐碱土中, MS 处理效果最为明显, 胶体粒径由 785.7 nm 降至 360.2 nm; 中度盐碱土中, CM 处理效果最为明显, 胶体粒径由 675.8 nm 降至 393.6 nm。(2) 土壤胶体稳定性与土壤盐碱程度有关。与非盐碱土和轻度盐碱土相比, 中度盐碱土胶体具有极高的稳定性, 这可能与其高 pH、高碱度相关。(3) 不同有机物料对非盐碱土和轻度盐碱土胶体稳定性的影响较小, 但 CM 和 MS 处理显著降低中度盐碱土胶体稳定性, 胶体颗粒发生聚沉。因此在中度盐碱土中, 与生物炭相比, 施用牛粪和玉米秸秆可能具备更加明显的改良效果。综上所述, 有机物料的施用改善了盐碱土胶体的基本理化性质, 优化了土壤胶体状态; 与生物炭相比, 牛粪和玉米秸秆因其丰富的官能团和养分, 施入土壤后显著降低了中度盐碱土胶体稳定性, 进而导致胶体颗粒絮凝, 促进微团聚体的形成。

**关键词:** 土壤胶体; 生物炭; 牛粪; 玉米秸秆; Zeta 电位; DLVO 理论

中图分类号: S153 文献标志码: A

## Effects of Different Organic Materials on the Stability of Saline-alkali Soil Colloid

SUN Yuliang<sup>1</sup>, LI Qirui<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>1, 2</sup>, SHANG Jianying<sup>1, 2†</sup>

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**Abstract:** [ Objective ] Soil colloid stability plays an important role in soil nutrient retention, structure formation and crop growth. The application of organic materials is an effective method for improving saline-alkali soil, but their effects on soil colloid stability in these conditions remain unclear. [ Method ] In this study, we investigated the effects of biochar (BC), cattle manure (CM), and maize straw (MS) on soil colloid stability at different salinity-alkalinity levels (non-saline-alkali, mild saline-alkali,

\* 内蒙古自治区科技兴蒙项目 (2021EEDSCXSQZD011)、鄂尔多斯市国家可持续发展议程创新示范区建设科技支撑项目 (KCX2024005) 资助 Supported by the Rejuvenating Inner Mongolia with Science and Technology (No. 2021EEDSCXSQZD011) and the Ordos National Sustainable Development Agenda Innovation Demonstration Zone Construction Science and Technology Support Project (No. KCX2024005)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jyshang@cau.edu.cn

作者简介: 孙豫梁 (2000—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: 3067273175@qq.com

收稿日期: 2024-08-30; 收到修改稿日期: 2024-10-27; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-02-18

and moderate saline-alkali) through soil incubation and sedimentation experiments in the laboratory. 【 Result 】 (1) The addition of organic materials significantly reduced the diameter of saline-alkali soil colloidal particles, making it similar to the diameter of non-saline-alkali soil colloid. In mild saline-alkali soil, the effect of MS treatment was most effective, and the colloidal particle size decreased from 785.7 nm to 360.2 nm. In moderate saline-alkali soil, the effect of CM treatment was most effective, decreasing the colloidal particle size from 675.8 nm to 393.6 nm. (2) The stability of soil colloids was related to the degree of soil salinity. Compared with non-saline-alkali soil and mild saline-alkali soil, moderate saline-alkali soil colloid exhibited significantly high stability, likely due to elevated high pH and high alkalinity. (3) Organic materials had minimal effect on the colloid stability of non-saline-alkali soil and mild saline-alkali soil. However, CM and MS treatments significantly reduced the colloid stability of moderate saline-alkali soil, causing colloidal particles to agglomerate. Therefore, in moderate saline-alkali soil, the application of cow manure and maize straw may be more effective than biochar for stability improvement. 【 Conclusion 】 The application of organic materials ameliorates the basic physicochemical properties of saline-alkali soil and optimizes the state of soil colloid. Compared with biochar, cattle manure and maize straw, due to their rich functional groups and nutrients, significantly reduced the colloid stability of moderate saline-alkali soil upon application, thereby inducing colloidal aggregation and promoting the formation of microaggregates.

**Key words:** Soil colloid; Biochar; Cow manure; Maize straw; Zeta potential; DLVO theory

土壤胶体是指存在于土壤中的微小颗粒，其直径通常在 1 纳米至 1 微米或 2 微米之间，主要包括黏土矿物、有机质（如腐殖质）以及铁、铝氧化物等。这些微小的颗粒因其较大的比表面积和高表面电荷，具有很强的吸附能力和反应活性，在土壤的物理、化学及生物过程中起着关键作用<sup>[1]</sup>。在盐碱土环境中，由于高含量的盐基离子，如钠、钙、镁等，土壤胶体表现出独特的化学反应性，进而影响土壤的物理和化学性质<sup>[2-3]</sup>。同时，盐碱土中通常含有大量碳酸根和碳酸氢根离子，这些离子使得土壤具有较高的碱度，导致土壤 pH 偏高。通常碱性环境下，土壤胶体的电荷特性发生变化，其稳定性和迁移能力明显增强<sup>[4-5]</sup>。高度分散的土壤胶体会堵塞土壤孔隙，使得土壤中水气难以协调，导致土壤结构恶化<sup>[6]</sup>；土壤中的营养物质或污染物可能与土壤胶体结合，发生协同运移，造成更大范围的养分流失或污染问题<sup>[7-8]</sup>。因此，研究和理解不同有机物料对盐碱土胶体稳定性的影响，对于制定合理的盐碱土改良措施具有重要的科学和实践意义。

改善盐碱土结构的核心在于提高土壤胶体的絮凝和聚沉能力，降低其迁移性，增强土壤团聚体的形成和稳定性。基于土壤胶体稳定性的机理来看，可以通过一系列措施来促进土壤胶体的絮凝，如调整土壤矿物组成<sup>[9]</sup>、增加土壤有机质含量<sup>[10]</sup>、增强土壤溶液中的离子强度，尤其是增加二价或三价阳离子含量<sup>[11-14]</sup>，以及降低溶液 pH<sup>[15]</sup>。这些方法均

能通过改变土壤胶体的电荷分布和分散状态促使其凝聚成微团聚体，从而改善土壤结构，增强土壤物理性能。

在各种土壤改良方法中，外源添加有机物料是一种被广泛应用的有效措施。常见有机物料包括秸秆、粪肥和近年来备受关注的生物炭。研究表明，施用秸秆和粪肥能够显著降低盐碱土容重、盐分含量、pH 和碱化度等关键指标<sup>[16]</sup>。其改良盐碱土的机制可归结为以下几个方面：首先，秸秆和粪肥还田后，通过矿化分解增加土壤中的多糖、脂类等有机胶结物质，这些物质有助于土壤团聚体的形成，进而改善土壤结构；其次，秸秆和粪肥中的有机官能团（如羧基、羟基等）具有弱酸特性，这些官能团通过酸碱中和作用降低盐碱土的 pH。此外，这些官能团还能通过络合作用降低土壤中交换性钠的含量，减少钠离子对土壤结构的破坏，进而有效改善土壤的理化性质。

近年来，生物炭凭借其独特的结构特性和环境效应，在盐碱地改良中展现出巨大的应用潜力。首先，生物炭发达的孔隙结构大大增加其吸附面积，使其能够有效捕捉和固定土壤中的盐分和其它有害物质；其次，生物炭碳含量丰富，能够为土壤提供稳定的有机碳源，促进微生物活动和有机质积累，从而提升土壤肥力；最后，生物炭还含有一定量的有效养分，如钾、钙、镁等阳离子，这些养分能够有效改善盐碱土的理化性质，进一步提高土壤的健

康状态和生产潜力<sup>[17]</sup>。Drake 等<sup>[18]</sup>的研究表明,生物炭不仅能改善盐碱土的结构,降低土壤的 pH 和电导率,还能够促进植物的生长,提升土壤的生物生产力。此外,项子宸等<sup>[19]</sup>的研究显示,施用 2% 的竹子生物炭能够使滨海盐碱土的电导率和含盐量分别降低 93.75% 和 44.04%, 这意味着土壤盐分显著减少,改良效果非常显著。

目前,关于有机物料对盐碱土的研究主要集中在对土壤基础理化性质和作物产量的影响上,而从胶体稳定性角度探讨不同有机物料对盐碱土改良效果的研究相对较少。深入研究不同有机物料对盐碱土胶体稳定性的影响,不仅可以为盐碱土的改良提供更加科学的依据,还能够为因地制宜地选择合适的有机物料提供指导。因此,本研究选择生物炭、牛粪和玉米秸秆三种典型有机物料,通过室内培养实验,利用动态光散射仪、紫外分光光度计、傅里叶红外变换光谱等技术手段,结合 DLVO 理论,系统分析不同有机物料在施入盐碱土后对胶体稳定性的影响,以期更加全面地理解有机物料在改良盐碱土过程中所发挥的作用机制和改良效果,为未来盐碱土改良措施的设计和应用提供科学依据和实践指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤分别取自内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗西海村(40°49' N, 109°87' E)、乌兰村(40°45' N, 109°32' E)和昭君镇四村(40°47' N, 109°56' E)。该地区地处黄河中游南岸灌区,海拔高度约为 1 000 m 至 1 500 m,年均温 6.8℃,年均降水量约 300 mm,年蒸发量约为 2 500 mm,属于温带大陆气候。土壤类型主要为栗钙土和棕钙土,种植作物以向日葵、玉米为主,一年一熟制。采用五点取样法采集农田 0~20 cm 非根际土壤,于室内去除土样中的碎石子和枯枝落叶,风干,过 2 mm 筛,备用。根据所测土样电导率和水溶性总盐含量,将三个取样点所取土样分为非盐碱土、轻度盐碱土和中度盐碱土。土壤 pH 通过电极法(水土比 5:1)测定;电导率采用电导率仪(水土比 5:1)测定;有机碳含量采用碳氮元素分析仪测定;水溶性总盐采用残渣烘干法测定;土壤质地采用吸管法测定。供试土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	pH	电导率 EC/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon/ (g·kg <sup>-1</sup> )	水溶性总盐 Water-soluble salt content/ (g·kg <sup>-1</sup> )	砂粒 Sand (2~0.05 mm) /%	粉粒 Silt (0.05~ 0.002 mm) /%	黏粒 Clay (<0.002 mm) /%
非盐碱土 <sup>①</sup>	8.61	0.57	10.73	0.66	56.33	13.90	29.77
轻度盐碱土 <sup>②</sup>	8.3	2.49	12.15	7.16	45.43	24.25	30.32
中度盐碱土 <sup>③</sup>	8.66	5.24	12.87	15.75	29.67	37.36	32.97

① Non-saline-alkali soil; ② Mild saline-alkali soil; ③ Moderate saline-alkali soil.

玉米秸秆(MS)取自北京市中国农业大学上庄实验站,牛粪(CM)取自山东省东营市垦利区垦利良种场,生物炭(BC)(450℃工业生物炭)购自南京勤丰众成生物质新材料有限公司。上述材料经风干、粉碎后过 1 mm 筛备用。有机物料的 pH、电导率 EC 采用浸提法测定:称取 2.00 g 有机物料于

20 mL 蒸馏水中,充分搅拌 20 min,静置 30 min,使用 pH 计和电导率仪测定。有机碳含量采用碳氮元素分析仪测定。结果显示,玉米秸秆、牛粪和生物炭的 pH 分别为 4.02、7.17、9.37;电导率分别为 3.37、2.75、2.12 mS·cm<sup>-1</sup>;有机碳含量分别为 401、319、252 g·kg<sup>-1</sup>。

## 1.2 有机物料光谱表征

采用衰减全反射-红外光谱仪 (ATR-FTIR, Nicolet iS 10, 赛默飞世尔, 美国) 对有机物料的表面官能团进行表征分析, 其中波数范围设置为  $4\ 000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ , 每次扫描分辨率为  $4.0\text{ cm}^{-1}$ , 每个样品扫描 30 次求取平均值以获得稳定的测试结果。

## 1.3 土壤培养与土壤胶体制备

分别将三种有机物料 (BC、CM 和 MS) 按质量比 3% 与供试土壤充分混合, 以不添加有机物料作为对照 (CK), 每个处理设置三组重复。将充分混合后的土壤样品在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下培养, 保持土壤含水量为田间持水量的 60%, 室内培养 90 d 后, 将土壤风干备用。

土壤胶体采用沉降法<sup>[20-21]</sup>提取: 将 5.00 g 各处理培养后的土壤样品放入 1 L 烧杯中, 加蒸馏水, 并在超声波清洗器中超声分散 60 min。然后, 将悬液全部转移至 1 L 沉降筒内, 加入蒸馏水至最大量程, 用搅拌棒上下搅拌悬液 1 min, 确保所有土粒均能悬浮。保持室温为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以搅拌结束为沉降起始时间, 待沉降 7 h 49 min 后, 用虹吸管吸取上层 10 cm 的悬浊液, 获得土壤胶体 (直径  $< 2\ \mu\text{m}$ ) 悬液。土壤胶体悬液在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下烘干后, 采用重量差量法测定浓度。

## 1.4 土壤胶体粒径和电位的测定

土壤胶体的粒径和 Zeta 电位采用动态光散射分析仪 (Zetasizer Nano ZS 90, 马尔文有限公司, 英国) 进行测定。选用  $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaCl 作为背景电解质溶液, 配制  $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的胶体悬液, 调节 pH 为 7.0, 工作温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 测定土壤胶体的平均颗粒直径和 Zeta 电位。

## 1.5 土壤胶体稳定性的测定

土壤胶体的稳定性通过紫外分光光度计

(Tu1900, 普析, 中国) 进行测定。选用不同浓度的 NaCl ( $1\sim 1\ 000\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 和  $\text{CaCl}_2$  ( $0.5\sim 10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 作为背景电解质溶液, 设置土壤胶体悬液的浓度为  $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 使用  $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 HCl 和 NaOH 调节土壤胶体悬浮液 pH 为  $7.0\pm 0.2$ , 工作温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将土壤胶体与盐溶液充分混和后, 加入光程 10 mm 石英比色皿中, 在 300 nm 波长下, 每 2 min 测定一次吸光度, 共测定 120 min, 最终获得土壤胶体在不同离子浓度下的相对吸光度变化曲线和沉积速率常数变化曲线。沉积速率常数 ( $k_{\text{dep}}$ ) 作为比较土壤胶体在不同盐浓度中稳定性的参数, 使用式 (1) 进行计算<sup>[22]</sup>:

$$k_{\text{dep}} = -\frac{\ln \frac{A}{A_0}}{t} \quad (1)$$

式中,  $A$  和  $A_0$  为测定终点和初始时刻的吸光度,  $t$  为沉积时间。

## 1.6 DLVO 计算

胶体颗粒间的总作用能采用经典的 DLVO 理论定量解释。DLVO 理论定义液体中带电胶体粒子之间的总作用势能由范德华引力势能 ( $E_{\text{VDW}}$ ) 和静电斥力势能 ( $E_{\text{EDL}}$ ) 组成。视胶体颗粒为球形, 采用球形-球形模型进行计算。范德华引力势能和静电斥力势能分别由式 (2) 和式 (3) 进行计算<sup>[23-24]</sup>:

$$E_{\text{VDW}} = -\frac{AR}{12h} \left[ 1 - \frac{5.32h}{\lambda_0} \ln \left( 1 + \frac{\lambda_0}{5.32h} \right) \right] \quad (2)$$

式中,  $A$  为 Hamaker 常数, 取其值为  $1.86 \times 10^{-20}\text{ J}$ ;  $R$  为胶体颗粒半径,  $h$  为胶体与收集器表面之间的距离;  $\lambda_0$  为距离达到 100 nm 时的特征波长。

$$E_{\text{EDL}} = 0.5\pi\epsilon R \left\{ 2\varphi_1\varphi_2 \ln \left[ \frac{1 + \exp(-\kappa h)}{1 - \exp(-\kappa h)} \right] + (\varphi_1^2 + \varphi_2^2) \ln [1 - \exp(-2\kappa h)] \right\} \quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  为介质的介电常数;  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为胶体的表面电势, 可用 Zeta 电位替代;  $\kappa$  为德拜长度的倒数。

由上述公式即可得到相互作用势能曲线, 并得出最大势能壁垒 ( $\Phi_{\text{max}}$ )。此概念表示胶体颗粒在初级能阱沉积所需的最小能量, 一旦胶粒之间的相互作用力超过最大势能壁垒, 此时胶粒之间将会发生

不可逆转的聚沉。

## 2 结 果

### 2.1 有机物料红外光谱特征与土壤胶体性质分析

三种有机物料红外光谱特征吸收峰的相对强度

存在差异(图1)。在 $3300\text{ cm}^{-1}$ 处的-OH伸缩振动、 $2920\text{ cm}^{-1}$ 处的脂族C-H振动和 $1050\text{ cm}^{-1}$ 处的碳水化合物C-O振动吸收峰<sup>[25-26]</sup>的相对强度高低顺序为:MS>CM>BC;在 $1640\text{ cm}^{-1}$ 处的芳香C=C振动和 $1420\text{ cm}^{-1}$ 处的芳香环上C-H振动吸收峰<sup>[27]</sup>的相对强度高低顺序为:CM>MS>BC。

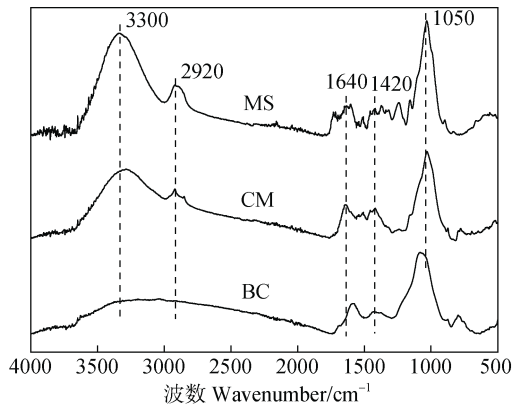


图1 生物炭(BC)、牛粪(CM)和玉米秸秆(MS)的傅里叶变换红外光谱

Fig. 1 FTIR spectrum of biochar (BC), cattle manure (CM) and maize straw (MS)

添加有机物料后土壤胶体含量、颗粒直径和

Zeta 电位等基本性质如表 2 所示。非盐碱土中,添加不同有机物料显著降低土壤中胶体含量;轻度盐碱土中,CM 显著增加土壤胶体含量,相反 MS 显著降低土壤胶体含量;中度盐碱土中,CM 和 MS 显著增加土壤胶体含量,而 BC 显著降低土壤胶体含量。非盐碱土胶体颗粒直径范围为 $384.1\sim 459.0\text{ nm}$ ,添加不同有机物料使轻度和中度盐碱土胶体颗粒直径均降低。例如:轻度盐碱土中添加 MS 后,胶体颗粒直径由 $785.7\text{ nm}$ 降低至 $360.2\text{ nm}$ ,降低 $54.2\%$ ;中度盐碱土中,添加 CM 和 MS 后,土壤胶体颗粒直径分别降至 $393.6\text{ nm}$ 和 $415.8\text{ nm}$ 。不同有机物料均增加土壤胶体 Zeta 电位的绝对值,提高胶体的最大势能壁垒( $\Phi_{\text{max}}$ )。如在轻度盐碱土中,添加 MS 处理,胶体的 $\Phi_{\text{max}}$ 由 $33.9\text{ kT}$ 增加至 $82.2\text{ kT}$ ,增加 $143\%$ 。

## 2.2 不同有机物料对非盐碱土胶体稳定性的影响

不同有机物料的添加提高了非盐碱土胶体的 Zeta 电位绝对值(图 2)。在 NaCl 体系中,CK 处理胶体的 Zeta 电位变化范围是 $-22.93\sim -12.16\text{ mV}$ ,添加不同有机物料后,土壤胶体 Zeta 电位变化范围是 $-27.67\sim -14.27\text{ mV}$ 。CaCl<sub>2</sub>体系中,CK 处理土壤胶体 Zeta 电位变化范围是 $-13.10\sim -9.10\text{ mV}$ ,添加 BC

表 2 不同有机物料处理下土壤胶体基本性质

Table 2 Basic properties of soil colloid with different organic materials addition

土壤类型	处理	胶体含量	颗粒直径	Zeta 电位	最大势能壁垒
Soil type	Treatment	Colloid content/%	Particle diameter/nm	Zeta potential/ mV	$\Phi_{\text{max}}/\text{kT}$
非盐碱土 Non-saline-alkali soil	CK	16.9a	$429.6\pm 18.8\text{b}$	$-22.9\pm 0.5\text{a}$	43.1
	BC	13.9c	$384.1\pm 8.0\text{c}$	$-26.9\pm 0.5\text{bc}$	62.4
	CM	14.2bc	$459.0\pm 12.9\text{a}$	$-27.7\pm 0.9\text{c}$	76.5
	MS	12.9d	$437.2\pm 15.9\text{ab}$	$-26.2\pm 0.4\text{b}$	62.1
轻度盐碱土 Mild saline-alkali soil	CK	16.5b	$785.7\pm 68.1\text{a}$	$-17.6\pm 0.7\text{a}$	33.9
	BC	17.1b	$421.8\pm 19.6\text{bc}$	$-28.0\pm 2.1\text{bc}$	73.0
	CM	18.0a	$420.6\pm 18.4\text{bc}$	$-25.9\pm 1.3\text{b}$	60.7
	MS	10.9c	$360.2\pm 7.8\text{c}$	$-30.7\pm 1.3\text{d}$	82.2
中度盐碱土 Moderate saline-alkali soil	CK	5.7b	$675.8\pm 154.2\text{a}$	$-22.0\pm 0.8\text{a}$	59.3
	BC	4.6c	$574.0\pm 37.7\text{a}$	$-23.1\pm 1.8\text{a}$	62.3
	CM	9.0a	$393.6\pm 17.7\text{b}$	$-29.7\pm 0.5\text{c}$	77.8
	MS	9.4a	$415.8\pm 17.7\text{b}$	$-27.2\pm 0.5\text{b}$	65.7

注:通过最小显著性差异法(LSD)比较数据间的差异,同一土壤不同处理间无相同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。Note: Differences between data were compared by the Least Significant Difference (LSD) method, and different letters between treatments on the same soil indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

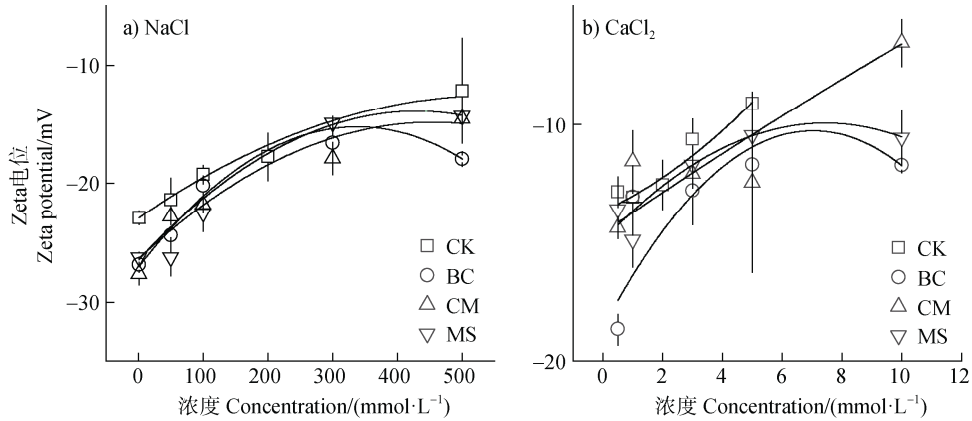
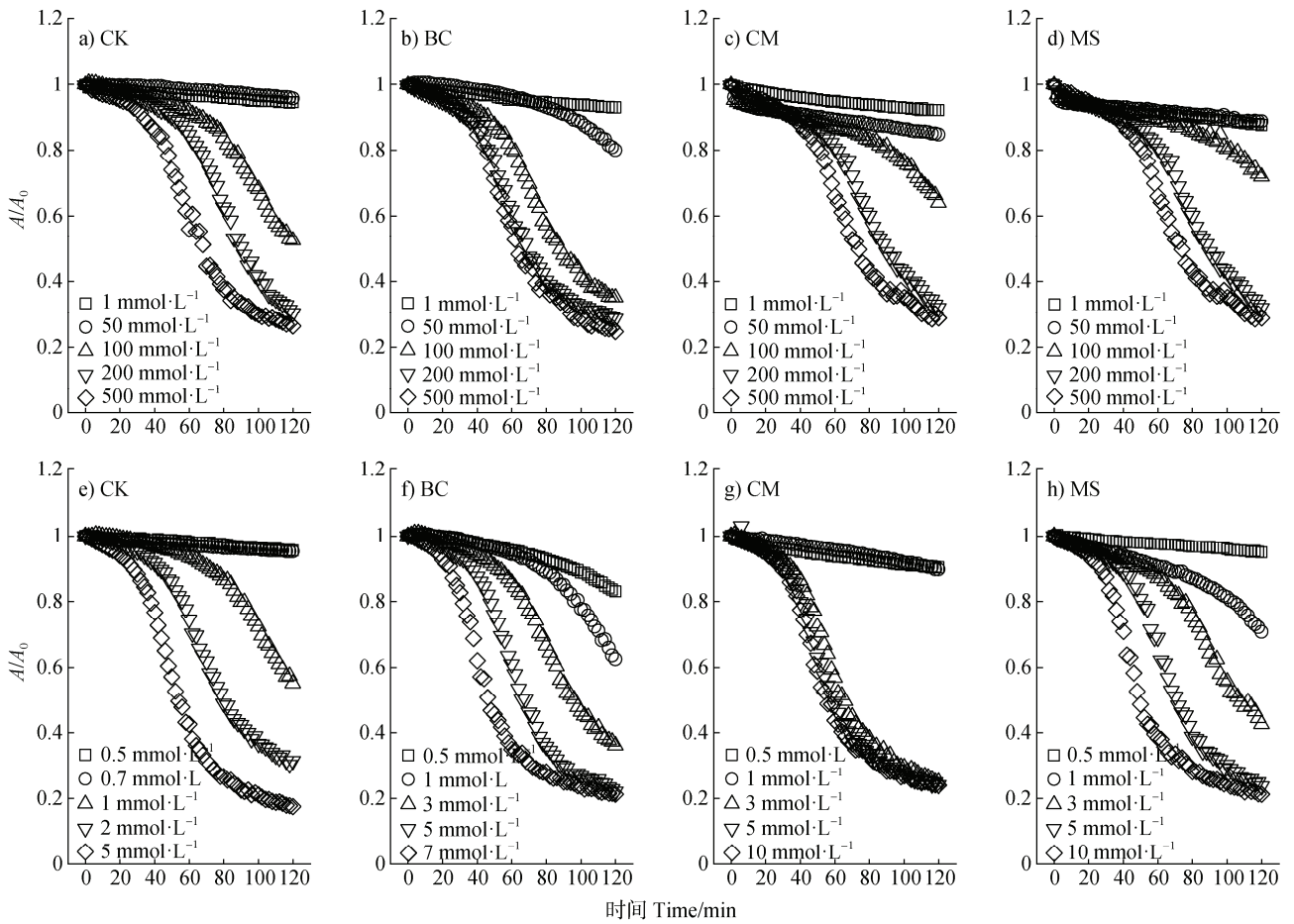


图 2 不同有机物料对非盐碱土胶体 Zeta 电位的影响

Fig. 2 Effect of different organic materials on colloidal Zeta potential of non-saline-alkali soil

处理，土壤胶体 Zeta 电位明显降低，变化范围为 -18.67~-11.70 mV。

添加有机物料对 NaCl 体系中非盐碱土胶体稳定性的影响存在差异 (图 3)。CK 处理下土壤胶体



注:图 a-d 背景电解质为 NaCl 溶液,图 e-h 为 CaCl<sub>2</sub> 溶液。Note: Background electrolyte: NaCl solution ( figure a-d ), CaCl<sub>2</sub> solution ( figure e-h ) .

图 3 不同有机物料对非盐碱土胶体相对吸光度的影响

Fig. 3 Effect of different organic materials on the relative absorbance of non-saline-alkali soil colloid

悬浮液在  $1\sim 50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的离子强度下表现出较强的稳定性,但随着离子强度增加,相对吸光度迅速降低,胶体稳定性减弱。例如:NaCl 溶液浓度为  $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,各处理的相对吸光度表现为:MS ( $0.72$ ) > CM ( $0.64$ ) > CK ( $0.52$ ) > BC ( $0.35$ ),说明该盐浓度下,添加 MS 和 CM 增强土壤胶体稳定性,添加 BC 减弱土壤胶体稳定性。在  $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{CaCl}_2$  溶液中,添加不同有机物料的相对吸光度表现为:CM ( $0.90$ ) > MS ( $0.71$ ) > BC ( $0.62$ ) > CK ( $0.55$ ),说明在该盐浓度下,三种有机物料增强土壤胶体的稳定性,其中 CM 处理效果最为明显。

不同有机物料对非盐碱土胶体沉积速率的影响

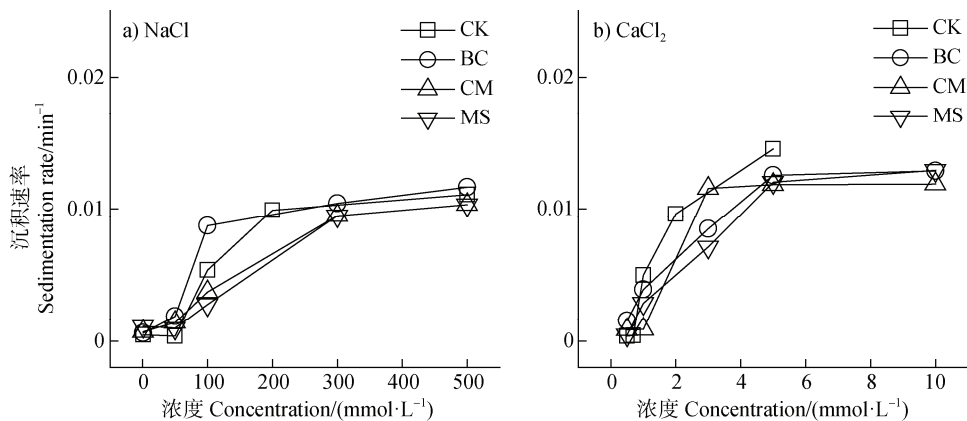


图 4 不同有机物料对非盐碱土胶体沉积速率的影响

Fig. 4 Effect of different organic materials on the colloid deposition rate of non-saline-alkali soil

### 2.3 不同有机物料对轻度盐碱土胶体稳定性的影响

有机物料提高轻度盐碱土胶体 Zeta 电位的绝对值,这种现象在低浓度盐溶液下更加明显(图 5)。NaCl 体系中,CK 处理土壤胶体 Zeta 电位变化较小

( $-18.27\sim -12.03\text{ mV}$ ),添加不同有机物料后,土壤胶体 Zeta 电位变化范围变大( $-30.70\sim -11.80\text{ mV}$ ),且对电解质浓度变化响应更加敏感。NaCl 溶液浓度由  $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  改变至  $500\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,各处理 Zeta

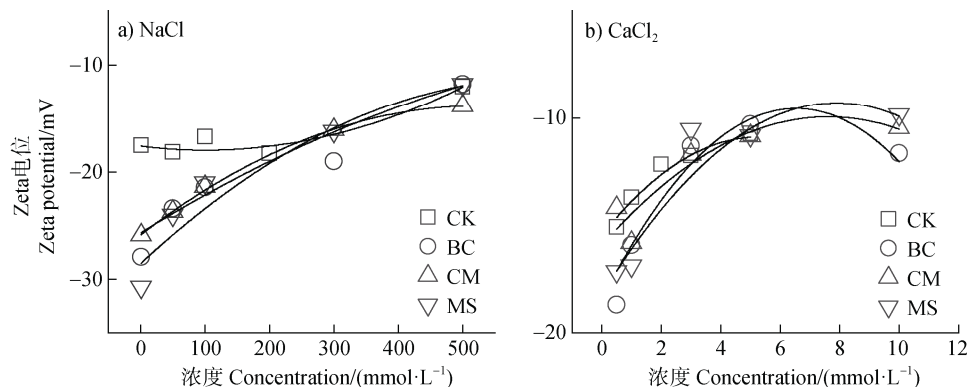


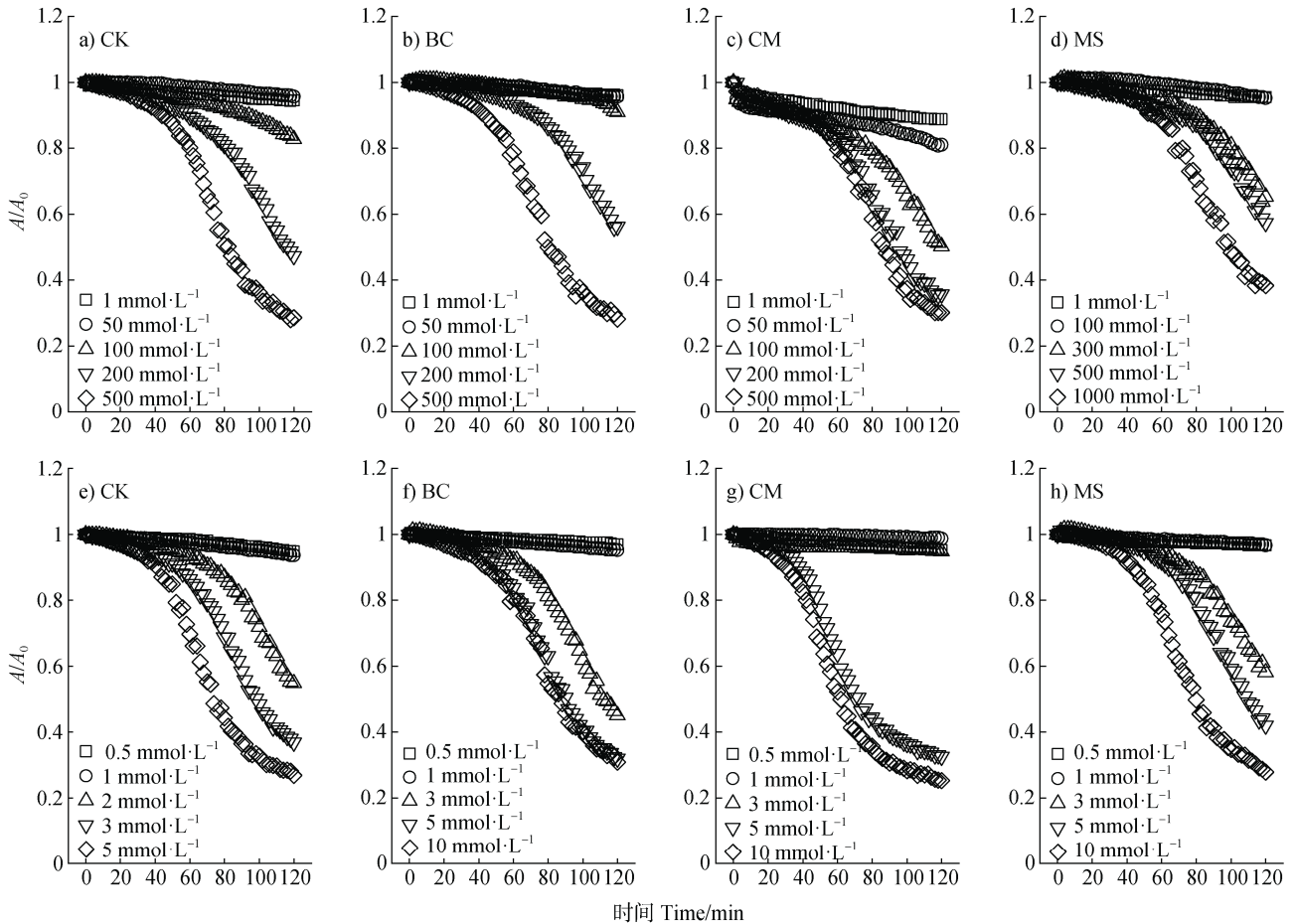
图 5 不同有机物料对轻度盐碱土胶体 Zeta 电位的影响

Fig. 5 Effect of different organic materials on colloidal Zeta potential of mild saline-alkali soil

电位的变化值为：MS (18.90 mV) > BC (16.17 mV) > CM (12.06 mV) > CK (6.24 mV)。CaCl<sub>2</sub> 体系中，添加不同有机物料对土壤胶体 Zeta 电位影响不大。

不同有机物料对轻度盐碱土胶体稳定性的影响存在差异 (图 6)。NaCl 体系中，在 100 mmol·L<sup>-1</sup> 的离子强度下，各处理的相对吸光度表现为：MS (0.95) > BC (0.91) > CK (0.83) > CM (0.50)。

表明该盐浓度下 MS 和 BC 增强土壤胶体稳定性，土壤胶体颗粒均匀地分散在悬浮液中；而 CM 减弱土壤胶体稳定性，胶体颗粒发生碰撞，形成聚集体，产生沉降。CaCl<sub>2</sub> 体系中，添加有机物料后，土壤胶体稳定性增强。例如：在 3 mmol·L<sup>-1</sup> 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液中，各处理的相对吸光度表现为：CM (0.58) > BC (0.45) > CK (0.37)，其中 CM 增强胶体稳定性的效果最显著。



注：图 a-d 背景电解质为 NaCl 溶液，图 e-h 为 CaCl<sub>2</sub> 溶液。Note: Background electrolyte: NaCl solution (figure a-d), CaCl<sub>2</sub> solution (figure e-h).

图 6 不同有机物料对轻度盐碱土胶体相对吸光度的影响

Fig. 6 Effect of different organic materials on the relative absorbance of mild saline-alkali soil colloid

不同有机物料对轻度盐碱土胶体沉积速率的影响如图 7 所示。NaCl 体系中，MS 增强土壤胶体稳定性效果最显著 (1 000 mmol·L<sup>-1</sup>,  $k_{\text{dep}} = 0.008 \text{ min}^{-1}$ )，该处理下土壤胶体稳定性受土壤溶液中离子强度影响较小。CaCl<sub>2</sub> 体系中，不同有机物料降低胶体颗粒的沉积速率常数。例如，在 1 mmol·L<sup>-1</sup>

的 CaCl<sub>2</sub> 溶液中，各处理的沉积速率常数为：CK (0.0006 min<sup>-1</sup>) > BC (0.0004 min<sup>-1</sup>) > MS (0.0003 min<sup>-1</sup>) > CM (0.0001 min<sup>-1</sup>)，其中 CM 处理降低效果最为显著。

**2.4 不同有机物料对中度盐碱土胶体稳定性的影响**  
不同有机物料对中度盐碱土胶体 Zeta 电位值影

响存在差异(图8)。当 NaCl 浓度为  $500 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, CM 和 MS 处理土壤胶体 Zeta 电位绝对值明显高于 CK 和 BC 处理。CaCl<sub>2</sub> 体系中, BC 处理土壤胶体 Zeta 电位绝对值明显降低。在  $1\sim 10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

CaCl<sub>2</sub> 的浓度范围内, 各处理 Zeta 电位变化值为:  $\text{CM} (6.39 \text{ mV}) > \text{CK} (5.89 \text{ mV}) > \text{MS} (5.07 \text{ mV}) > \text{BC} (4.48 \text{ mV})$ , 表明 BC 对土壤胶体稳定性的影响最不显著。

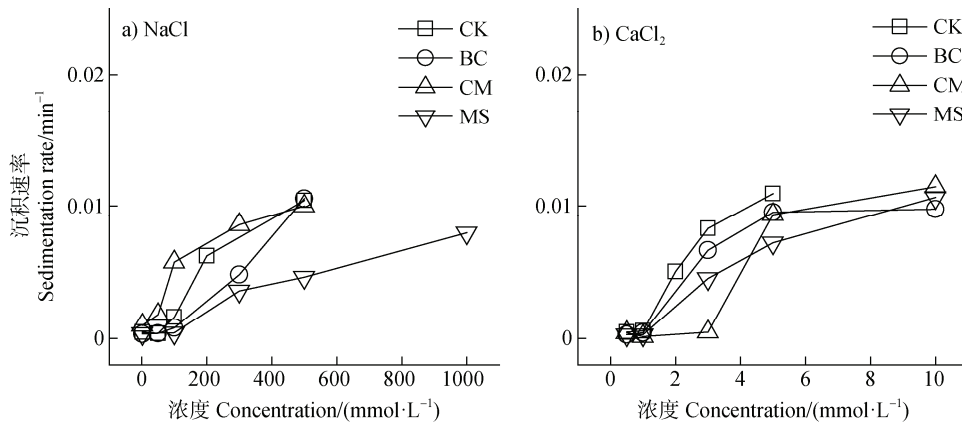


图7 不同有机物料对轻度盐碱土胶体沉积速率的影响

Fig. 7 Effect of different organic materials on the colloid deposition rate of mild saline-alkali soil

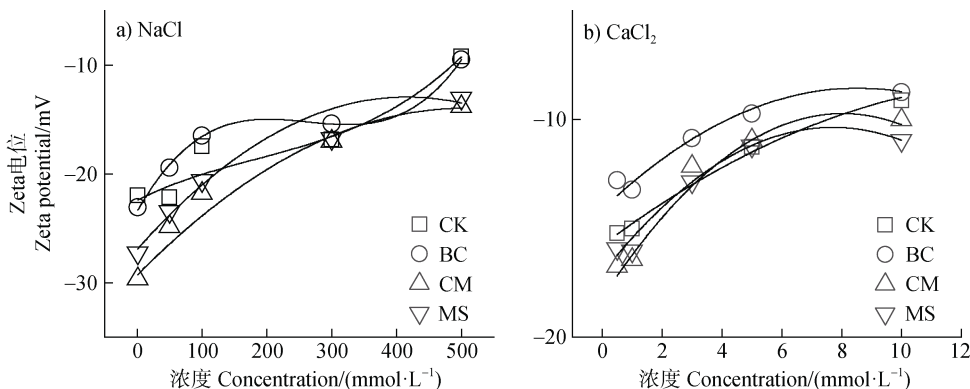


图8 不同有机物料对中度盐碱土胶体 Zeta 电位的影响

Fig. 8 Effect of different organic materials on colloidal Zeta potential of moderate saline-alkali soil

不同有机物料对中度盐碱土胶体稳定性的影响存在差异(图9)。NaCl 体系中, CK 处理土壤胶体稳定性极强, 不同盐浓度下胶体颗粒高度分散, 悬浮液的相对吸光度基本不随时间改变。添加有机物料后, 体系稳定性下降。其中, BC 对土壤胶体稳定性影响较小, 而 MS 和 CM 显著降低土壤胶体悬浮液的稳定性。如在  $500 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaCl 溶液中, 不同处理的相对吸光度表现为:  $\text{CK} (0.96) > \text{BC} (0.90) > \text{MS} (0.43) > \text{CM} (0.36)$ 。CaCl<sub>2</sub> 体系中胶体稳定性与 NaCl 体系中表现出相似的规律。

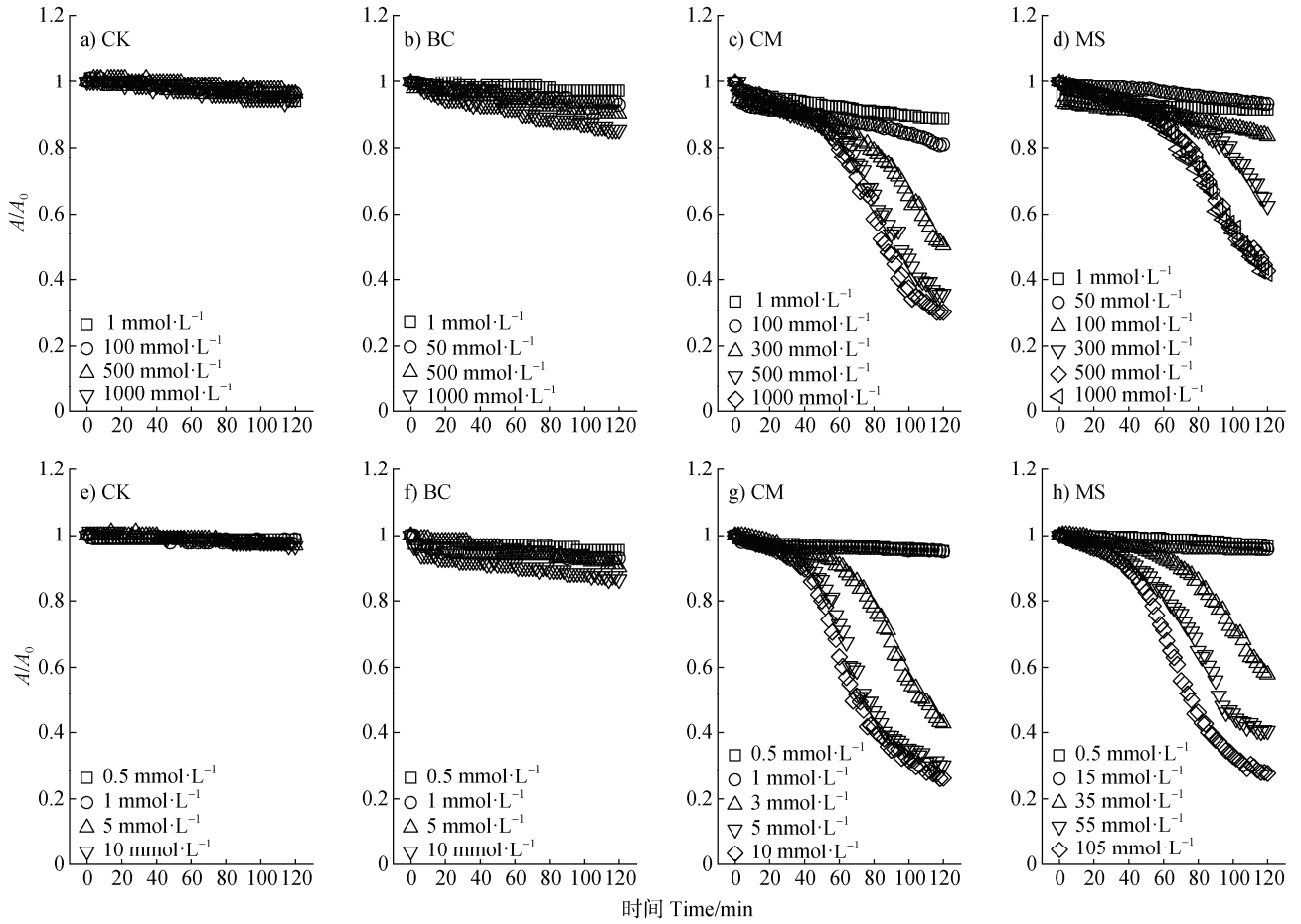
不同有机物料对中度盐碱土胶体沉积速率的影响如图 10 所示。NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 体系中, 添加不同有机物料后土壤胶体的沉积速率表现为:  $\text{CM} > \text{MS} >$

$\text{BC} > \text{CK}$ 。BC 处理后的土壤胶体的  $k_{\text{dep}}$  与 CK 相似, 基本不随盐浓度的变化而变化, 胶体稳定性极高, 而 MS 和 CM 处理的土壤胶体  $k_{\text{dep}}$  则随离子强度的增加而增加, 胶体稳定性减弱, 土壤胶体絮凝沉积。

### 3 讨论

#### 3.1 不同有机物料对盐碱土胶体基本性质的影响

在非盐碱土中, 添加有机物料后土壤胶体含量显著降低; 而轻度和中度盐碱土中则表现出不同的趋势, 这可能是与土壤盐分含量有关。土壤盐碱化后, 土壤胶体颗粒直径明显增大, 但添加有机物料后, 盐碱土的胶体粒径下降, 接近非盐碱土的平均



注：图 a-d 背景电解质为 NaCl 溶液，图 e-h 为 CaCl<sub>2</sub> 溶液。Note: Background electrolyte: NaCl solution ( figure a-d ), CaCl<sub>2</sub> solution ( figure e-h ) .

图 9 不同有机物料对中度盐碱土胶体相对吸光度的影响

Fig. 9 Effect of different organic materials on the relative absorbance of moderate saline-alkali soil colloid

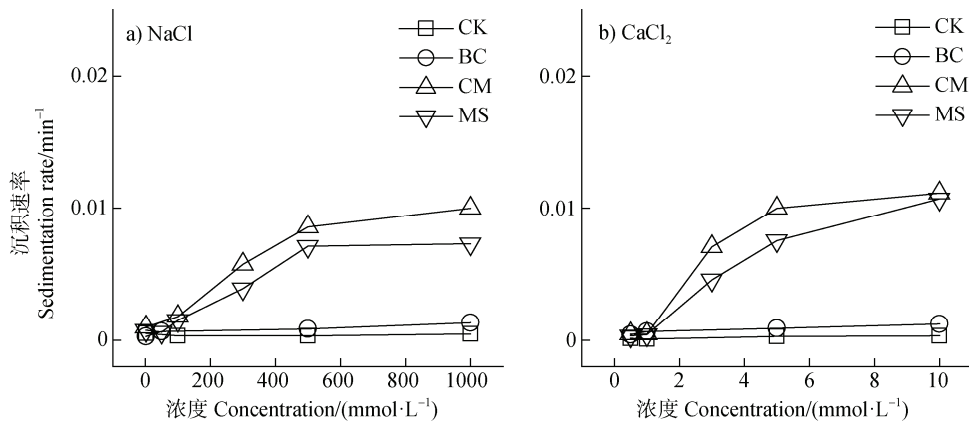


图 10 不同有机物料对中度盐碱土胶体沉积速率的影响

Fig. 10 Effect of different organic materials on the colloid deposition rate of moderate saline-alkali soil

粒径。这表明盐碱土在添加有机物料后土壤胶体条件得到优化，提高了土壤质量。一方面，土壤粒径

减小，比表面积增大，增强了其吸附性能，可以吸附更多的腐殖质和 Ca<sup>2+</sup>，进而降低土壤碱性，提高

土壤有机质含量<sup>[28]</sup>；另一方面，较小的胶体颗粒具有更高的表面能和电荷密度，更容易通过范德华力、氢键和静电引力等作用力与其他颗粒结合，形成稳定的团聚体，改善土壤结构。

Zeta 电位是表征胶体分散体系稳定性的重要指标，其绝对值越高，体系的稳定性越好，反之，胶体颗粒更容易聚集和沉降<sup>[29]</sup>。本实验在三种土壤施入有机物料后，土壤胶体的 Zeta 电位绝对值均得到提高，说明添加有机物料增强了土壤胶体的稳定性。这可能是有机物料施入土壤后增加了土壤有机质的含量，而有机质的增加又可以提高土壤胶体表面的负电荷数量，增强胶体颗粒之间的静电斥力，从而进一步提高胶体稳定性<sup>[30-32]</sup>。这种现象与任凯璐等<sup>[33]</sup>发现的施加有机物料显著提高土壤胶体稳定性的研究结果相吻合。这表明施用有机物料在改良盐碱土方面具有良好的应用前景，通过优化土壤胶体特性，改良土壤结构和功能，进而提升土壤整体质量。

### 3.2 不同有机物料对盐碱土胶体稳定性的影响

本研究结果表明，土壤胶体稳定性受到土壤盐碱程度的影响。在非盐碱土和轻度盐碱土中，随着背景电解质盐浓度的增加，土壤胶体稳定性逐渐降低。这一现象与高离子强度压缩土壤胶体的双电层有关，具体表现为胶体颗粒的聚集和沉降现象。然而，在中度盐碱土中，即使在  $1\ 000\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaCl 或  $10\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaCl}_2$  体系中，胶体颗粒依然保持极高的稳定性。相对吸光度曲线和胶体颗粒沉降曲线几乎不随时间变化，这表明中度盐碱土具有较强的抗聚集能力。造成这种现象的原因可能与中度盐碱土高 pH、高碱度以及含有较多硫酸盐等因素有关。研究表明，土壤的 pH 和总碱度与胶体颗粒的分散性之间存在显著的正相关关系。例如 Gupta 等<sup>[4]</sup>研究指出，随着 pH 和总碱度的增加，胶体颗粒更倾向于分散，并且临界絮凝浓度以指数方式增加，这意味着更高的碱度和 pH 会导致更强的胶体稳定性；Springer 等<sup>[34]</sup>研究进一步证实这一观点，其发现硫酸盐土壤相较于氯化物土壤对土壤总碱度变化更加敏感，在相同的总碱度变化条件下，硫酸盐土壤胶体的分散率变化更加显著。

外源物质的施用也会对土壤胶体稳定性产生显著影响。在非盐碱土和轻度盐碱土中，添加有机物料后，土壤胶体稳定性随盐浓度的升高而降低，不同处理之间无明显差异。在中度盐碱土中，不同处

理下土壤胶体稳定性则表现出明显的差异：在未添加有机物料的情况下，土壤胶体悬浮液保持极高的稳定性；而添加生物炭后，胶体稳定性略有下降，但仍保持较高的稳定性。相反，添加牛粪和玉米秸秆后，土壤胶体稳定性显著降低，这种现象在高浓度盐溶液中表现得尤为明显。造成这种差异的原因可能与牛粪和玉米秸秆中含有更多的羟基（-OH）、羧基（-COOH）等功能性基团，以及  $\text{Ca}^{2+}$  等离子子的存在相关。这些成分能够通过离子交换、酸碱中和作用，削弱  $\text{Na}^+$  对胶体颗粒的分散作用（图 1）。另一方面，与生物炭稳定的结构相比，牛粪和玉米秸秆富含易腐解的多糖、氨基酸和有机酸等组分，这使得其在施入土壤后能在短期内快速提高土壤有机质的含量<sup>[35-36]</sup>。有机质对盐碱土胶体分散稳定性的影响大部分以离子浓度为前提：当胶体悬浮液中离子浓度较低时，土壤有机质能够有效促进土壤胶体颗粒的分散，然而当悬浮液中离子浓度较高时，尤其是存在高浓度二价阳离子时，土壤有机质能够通过表面桥接作用显著降低胶体颗粒的稳定性，且有机质含量高的土壤其胶体稳定性下降程度更大<sup>[37-39]</sup>。

## 4 结 论

本文通过土壤培养实验和胶体稳定性实验揭示了有机物料对盐碱土胶体稳定性的影响与土壤盐碱程度、离子浓度以及有机物料类型之间的复杂关系。结果表明：外源添加有机物料能够改善盐碱土胶体基本性质，显著降低了盐碱土胶体的颗粒直径，在中度盐碱土中，添加牛粪和玉米秸秆显著增加了土壤胶体含量，表明有机物料的施用能够优化土壤胶体状态；土壤自身盐碱程度显著影响胶体颗粒的分散稳定性，中度盐碱土胶体分散稳定性最高，可能与其高 pH、高碱度和高硫酸盐成分含量有关；不同有机物料因其自身性质差异，施入土壤后会引发土壤理化性质的变化，进而影响土壤胶体稳定性：与生物炭相比，牛粪和玉米秸秆因其丰富的官能团和养分，施入土壤后显著降低了中度盐碱土胶体稳定性。这一变化导致胶体颗粒絮凝，促进微团聚体的形成。

### 参考文献 (References)

- [1] Yan J, Lazouskaya V, Jin Y. Soil colloid release affected by dissolved organic matter and redox conditions[J].

- Vadose Zone Journal, 2016, 15 (3) : 1—10. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.02.0026>.
- [ 2 ] So H B, Aylmore L. How do sodic soils behave - The effects of sodicity on soil physical behavior[J]. Soil Research, 1993, 31 (6) : 761—777.
- [ 3 ] Rengasamy P, Olsson K A. Sodicity and soil structure[J]. Soil Research, 1991, 29 (6) : 935—952.
- [ 4 ] Gupta R K, Bhumbra D K, Abrol I P. Effect of sodicity, pH, organic matter, and-calcium carbonate on the dispersion behavior of soils[J]. Soil Science, 1984, 137 (4) : 245—251.
- [ 5 ] Chairunnisya R A, Suryaningtyas D T, Iskandar. Clay flocculation level with multivalent cations on some paddy soils in Bogor District, West Java, Indonesia[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 824 (1) : 012004.
- [ 6 ] Xu Z J, Liu G S, Wang H Y, et al. Studies on the effect of fluorine pollution on the stability of soil colloid[J]. China Environmental Science, 2002, 22 (3) : 218—221. [许中坚, 刘广深, 王红宇, 等. 氟污染对土壤胶体稳定性影响的研究[J]. 中国环境科学, 2002, 22 (3) : 218—221.]
- [ 7 ] Liu Q L, Xu S H. Colloid-facilitated transport of contaminants in subsurface environment[J]. Soils, 2005, 37 (2) : 129—135. [刘庆玲, 徐绍辉. 地下环境中胶体促使下的污染物运移研究进展[J]. 土壤, 2005, 37 (2) : 129—135.]
- [ 8 ] Grolimund D, Borkovec M, Barmettler K, et al. Colloid-facilitated transport of strongly sorbing contaminants in natural porous media: A laboratory column study[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30 (10) : 3118—3123.
- [ 9 ] Shang S B, Wang F Y, Li X Q. Study on stability and mobility of soil colloids based on physicochemical property[J]. Soils, 2010, 42 (6) : 1015—1019. [商书波, 王丰雨, 李绪谦. 土壤胶体理化性质对其稳定性和可移动性的影响研究[J]. 土壤, 2010, 42 (6) : 1015—1019.]
- [ 10 ] Luo X J, Wang Z C, Yang F. Research progress on clay dispersion characteristics of saline-sodic soil[J]. Soils, 2024, 56 (2) : 255—263. [罗雪娇, 王志春, 杨帆. 苏打盐碱土壤黏粒分散特征研究进展[J]. 土壤, 2024, 56 (2) : 255—263.]
- [ 11 ] Zuo Y, Li S B, Wang T T, et al. Effect of different base ions on zeta potential and aggregation process of black soil colloid[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51 (1) : 99—104. [左研, 李少博, 王童彤, 等. 不同盐基离子对黑土胶体 zeta 电位及凝聚过程的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51 (1) : 99—104.]
- [ 12 ] Hu J D, Shen Y T, Wang X J. The effect of ionic strength and pH conditions on the release, deposition and dispersibility behaviors of natural soil colloid[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18 (2) : 629—637. [胡俊栋, 沈亚婷, 王学军. 离子强度、pH 对土壤胶体释放、分配沉积行为的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18 (2) : 629—637.]
- [ 13 ] Zhang R, Chen Y L, Wu X J, et al. Stability of different types of soil colloids under the influence of ionic strength and humic acid[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41 (6) : 2347—2357. [张然, 陈雅丽, 武晓娟, 等. 离子强度和胡敏酸影响下不同土壤胶体稳定性研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41 (6) : 2347—2357.]
- [ 14 ] Jin X, Li M H, Wang J W, et al. High-throughput screening of silver nanoparticle stability and bacterial inactivation in aquatic media: Influence of specific ions[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44 (19) : 7321—7328.
- [ 15 ] Yang X, Rao P H, He M. Dispersion-flocculation behavior of clay particles in soil environment and the influence factors[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2006, 24 (5) : 407—413. [杨炯, 饶品华, 何明. 土壤环境中粘粒的分散—凝聚行为及其影响因素[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2006, 24 (5) : 407—413.]
- [ 16 ] Zhang X M, Gao R P, Kang W Q, et al. Research progress of the straw returning on soil improvement in saline-alkali land[J]. Journal of Northern Agriculture, 2021, 49 (5) : 85—92. [张秀敏, 高日平, 康文钦, 等. 秸秆还田对盐碱地改良的研究进展[J]. 北方农业学报, 2021, 49 (5) : 85—92.]
- [ 17 ] Zhao W B, Wang S, Liu L L, et al. Effect of biochar amendment on saline-alkaline soil amelioration and plant growth: A literature review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55 (2) : 551—561. [赵维彬, 王松, 刘玲玲, 等. 生物炭改良盐碱地效果及其对植物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55 (2) : 551—561.]
- [ 18 ] Drake J A, Cavagnaro T R, Cunningham S C, et al. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils?[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27 (1) : 52—59.
- [ 19 ] Xiang Z C, Xiu H F, Ma K, et al. Effect of different ameliorants on coastal saline-alkali soil in eastern Zhejiang under elution conditions[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2020, 46 (3) : 344—359. [项子宸, 修海峰, 马琨, 等. 淋洗条件下不同改良剂对浙江东部滨海盐碱土的改良效果[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2020, 46 (3) : 344—359.]
- [ 20 ] Pan Y, Chen C, Shang J Y. Effect of reduced inherent organic matter on stability and transport behaviors of black soil colloids[J]. Chemosphere, 2023, 336: 139149.
- [ 21 ] Xu G L, Chen C, Shen C Y, et al. Hydrogen peroxide and high-temperature heating differently alter the stability and aggregation of black soil colloids[J]. Chemosphere, 2022, 287: 132018.
- [ 22 ] Li L, Sillanpää M, Risto M. Influences of water properties on the aggregation and deposition of

- engineered titanium dioxide nanoparticles in natural waters[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 132—138.
- [ 23 ] Gregory J. Interaction of unequal double layers at constant charge[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1975, 51 ( 1 ): 44—51.
- [ 24 ] Gregory J. Approximate expressions for retarded van der Waals interaction[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1981, 83 ( 1 ): 138—145.
- [ 25 ] Dong S S, Dou S, Shao M J, et al. Effect of corn stover deep incorporation with different years on composition of soil humus and structural characteristics of humic acid in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 ( 1 ): 150—159. [董珊珊, 窦森, 邵满娇, 等. 秸秆深还不同年限对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54 ( 1 ): 150—159.]
- [ 26 ] Romero E, Plaza C, Senesi N, et al. Humic acid-like fractions in raw and vermicomposted winery and distillery wastes[J]. *Geoderma*, 2007, 139 ( 3/4 ): 397—406.
- [ 27 ] Amir S, Jouraiphy A, Meddich A, et al. Structural study of humic acids during composting of activated sludge-green waste: Elemental analysis, FTIR and <sup>13</sup>C NMR[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 177 ( 1/2/3 ): 524—529.
- [ 28 ] Wang D, Fu B J, Chen L D, et al. Fractal analysis on soil particle size distributions under different land-use types: A case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 ( 7 ): 3081—3089. [王德, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2007, 27 ( 7 ): 3081—3089.]
- [ 29 ] Niu Y. Stability analysis of colloidal dispersions of saline soil and other materials at different temperatures[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018( 9 ): 223, 227. [牛岩. 在不同温度下土壤胶体分散系稳定性分析[J]. *现代农业科技*, 2018 ( 9 ): 223, 227.]
- [ 30 ] Zhu X, Chen H, Li W, et al. Evaluation of the stability of soil nanoparticles: The effect of natural organic matter in electrolyte solutions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68 ( 1 ): 105—114.
- [ 31 ] Chen M, Wang D J, Yang F, et al. Transport and retention of biochar nanoparticles in a paddy soil under environmentally-relevant solution chemistry conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 540—549.
- [ 32 ] Jekel M R. The stabilization of dispersed mineral particles by adsorption of humic substances[J]. *Water Research*, 1986, 20 ( 12 ): 1543—1554.
- [ 33 ] Ren K L, Zuo Y, Kou Q, et al. Comparative study on colloidal aggregation kinetics of brown earth under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 ( 2 ): 484—494. [任凯璐, 左研, 寇琪, 等. 长期不同施肥的棕壤胶体凝聚动力学比较[J]. *土壤学报*, 2024, 61 ( 2 ): 484—494.]
- [ 34 ] Springer G, Wienhold B J, Richardson J L, et al. Salinity and sodicity induced changes in dispersible clay and saturated hydraulic conductivity in sulfatic soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1999, 30 ( 15/16 ): 2211—2220.
- [ 35 ] Ma X, Xu M G, Zhao H L, et al. Decomposition characteristics and driving factors of organic materials in typical farmland soils in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 ( 9 ): 1564—1573. [马想, 徐明岗, 赵惠丽, 等. 我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 ( 9 ): 1564—1573.]
- [ 36 ] Guo J L, Jin H, Guo C X, et al. Effects of organic materials on soil organic carbon and fractions of active carbon in soda saline soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25 ( 8 ): 1290—1299. [郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 ( 8 ): 1290—1299.]
- [ 37 ] Li X G, Cui Z J, Wang L Y, et al. Effects of salinization and organic matter on soil structural stability and Atterberg limits[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 ( 4 ): 550—559. [李小刚, 崔志军, 王玲英, 等. 盐化和有机质对土壤结构稳定性及阿特伯格极限的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39 ( 4 ): 550—559.]
- [ 38 ] Chen K L, Elimelech M. Influence of humic acid on the aggregation kinetics of fullerene (C<sub>60</sub>) nanoparticles in monovalent and divalent electrolyte solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 309 ( 1 ): 126—134.
- [ 39 ] Lan Y Q, Hu Q Y, Xue J H. The role of exchangeable cation (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) and humic acid in the flocculation and dispersion of clays[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1997, 20 ( 1 ): 103—107. [兰叶青, 胡琼英, 薛家骅. 交换性阳离子和胡敏酸对粘土絮凝-分散的作用[J]. *南京农业大学学报*, 1997, 20 ( 1 ): 103—107.]

(责任编辑: 卢萍)