

DOI: 10.11766/trxb202012070675

单鱼洋, 马晨光, 王全九, 李晓菊, 陶汪海, 张继红, 苏李君, 曹玲. 羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1349–1358.

SHAN Yuyang, MA Chenguang, WANG Quanjiu, LI Xiaojun, TAO Wanghai, ZHANG Jihong, SU Lijun, CAO Ling. The Effect of Sodium Carboxymethyl Cellulose on Water Movement and Soil Hydraulic Parameters of Loamy Sand[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(5): 1349–1358.

羧甲基纤维素钠对壤砂土水分运动及水力参数的影响*

单鱼洋¹, 马晨光¹, 王全九¹, 李晓菊¹, 陶汪海¹, 张继红¹, 苏李君¹,
曹玲²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 陕西沣西新城投资发展有限公司, 西安 710000)

摘要: 科学使用羧甲基纤维素钠 (CMC) 实现保水控盐对于滨海壤砂盐碱土改良具有重要意义, 而明晰 CMC 对滨海壤砂土水分运动规律的影响是科学使用 CMC 的重要基础。为研究施加 CMC 滨海壤砂土水分运动规律, 本文通过开展一维垂直土柱积水入渗试验, 探索不同 CMC 施量 (0、0.1、0.2、0.4、0.6 g·kg⁻¹) 对壤砂土入渗特性、水分分布和土壤水力参数的影响。结果表明, 施用 CMC 土壤的最终累积入渗量增加了 4.90%~15.17%、达到预设湿润锋深度的入渗时间增加了 61.90%~604.73%; Philip 入渗模型参数吸渗率 S 和 Green-Ampt 模型参数 $K_s S_r$ 均随 CMC 施量的增加而减少, 吸渗率 S 和平均土壤水扩散率与 CMC 施量之间的数学关系分别可用二次多项式和指数函数来表示; CMC 增强了土壤的持水能力, 土壤剖面含水量提高了 0.72%~3.74%; CMC 通过改变土壤结构影响了土壤水力参数, 滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 及进气吸力倒数 α 均与 CMC 施量呈正相关关系, 而与饱和导水率 K_s 和形状系数 n 呈反比关系。通过对变异系数 CV 的分析发现, CMC 对饱和导水率 K_s 和进气吸力倒数 α 影响表现为中等差异, 对滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 和形状系数 n 表现为弱差异。研究结果揭示了 CMC 对滨海壤砂土减渗保水的内在机理, 为滨海盐碱地的改良提供了理论参考。

关键词: 羧甲基纤维素钠; 土壤入渗; 水分分布; 水力参数

中图分类号: S152 文献标志码: A

The Effect of Sodium Carboxymethyl Cellulose on Water Movement and Soil Hydraulic Parameters of Loamy Sand

SHAN Yuyang¹, MA Chenguang¹, WANG Quanjiu¹, LI Xiaojun¹, TAO Wanghai¹, ZHANG Jihong¹, SU Lijun¹, CAO Ling²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Fengxi Xincheng Investment Development Co., Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract: 【Objective】Scientific use of sodium carboxymethyl cellulose (CMC) to achieve water conservation and salt control is of great significance for the improvement of coastal sandy saline-alkali soil. It is therefore important to clarify the influence of CMC on the water movement law of coastal soil sand by evaluating the effect of CMC concentration on soil hydraulic parameters.

* 国家自然科学基金山东联合基金 (U1706211)、国家自然科学基金项目 (41830754, 51979220, 41907010) 资助。Supported by the Key Support Program of National Natural Science Foundation of China-Shandong United Foundation (No. U1706211), and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41830754, 51979220, 41907010)

作者简介: 单鱼洋 (1982—), 男, 辽宁省辽阳市人, 博士, 讲师, 主要从事盐碱地改良与微咸水高效利用研究。E-mail: syy031@126.com

收稿日期: 2020-12-07; 收到修改稿日期: 2021-04-27; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-05-13

【Method】In this study, a one-dimensional vertical infiltration experiment was carried out to study the effects of different CMC application amounts(0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 g·kg⁻¹) on the infiltration characteristics, water distribution, and soil hydraulic parameters.

【Result】The results showed that the final cumulative infiltration increased by 4.90%~15.17%, and the infiltration time to reach the preset wetting front depth increased by 61.90%~604.73% with the increase of CMC application. The adsorptivity S in the Philip infiltration model decreased from 0.685 cm·min^{-0.5} to 0.256 cm·min^{-0.5} and the parameter $K_s S_f$ in the Green-Ampt model decreased from 0.633 cm²·min⁻¹ to 0.096 cm²·min⁻¹ with CMC application. The S and the average soil water diffusivity could be described by a quadratic polynomial and exponential function, respectively. Soil water content increased by 0.7%~3.7% because CMC enhanced the soil water holding capacity. Additionally, the retention water content θ_r , saturated water content θ_s , and air-entry α reciprocal were positively correlated with the amount of CMC, and inversely proportional to the saturated water conductivity K_s and shape coefficient n . CMC induced a moderate variation to K_s and α , and a minor variation to θ_r , θ_s , and n .

【Conclusion】This study can provide a valuable theoretical reference for rational use of CMC for the improvement of coastal saline-alkali soil.

Key words: Sodium carboxymethyl cellulose; Soil infiltration; Water distribution; Hydraulic parameters

耕地是人类赖以生存的基本资源,然而随着人口数量逐渐增加,导致耕地资源紧张,难以维持日益增长的粮食需求^[1-2]。据联合国粮农组织统计,全世界可耕地正以每年 7×10^6 hm² 的速度在减少,到 2050 年地球上将不会再增加新的耕地资源,届时人均耕地面积仅为 0.15 hm²,人类社会的可持续发展将受到严重挑战^[3]。滨海盐碱地属于劣质土范畴,同时也是重要的后备土地资源,对滨海盐碱地进行改良与利用成为缓解耕地资源供需矛盾的重要途径^[4]。偏砂质滨海盐碱土的改良需要在抑制土壤盐分累积的同时提高土壤保水能力^[5],不断探寻高效保水控盐的新材料新方法,对于滨海盐碱地开发与可持续利用具有重要意义。

羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC)是一种水溶性高分子物质,其黏稠度高,能够增加土壤颗粒间的凝聚力,改善和维持土壤结构,具有良好保水效果^[6],又因其来源广泛、无毒无害、易被土壤中的微生物所降解,已经被众多学者应用于改善土壤结构与保水性能^[7]。邱朝霞等^[8]研究发现 CMC 可以提高土壤非毛管孔隙度;喜银巧等^[9]通过研究发现施加 CMC 增大风沙土内聚力,提高土壤抗剪强度,从而保水固沙促进沙漠区生态恢复;李虎军等^[10]研究发现 CMC 处理使土壤铵态氮在表层 15 cm 内维持较高质量分数并且可以提高土壤抗蚀能力及促进作物生长;吴军虎等^[11]研究发现 CMC 能够提高土壤的持水能力且对土壤水力参数产生影响。哈丽代姆·居麦等^[12]研究发现施加 CMC 降低了土壤水分的入渗,抑制了土面蒸

发过程。虽然 CMC 控盐与改良盐碱地方面的研究还鲜有报道,但是一些学者已经开始采用聚丙烯酰胺(PAM)、 γ -聚谷氨酸等水溶性高分子土壤改良剂对不同地区盐碱地进行改良^[13]。PAM 等水溶性高分子材料能够将土壤中的细小颗粒结合成较大团聚体,进而增加土壤孔隙率,为土壤盐分淋洗提供更多的通道,进而能够应用于盐碱地的改良^[14]。曹雨桐和余冬立^[15]应用 PAM 显著改善了江苏海涂围垦区盐碱土;阿力木·阿布来提等^[16]研究发现聚丙烯酰胺(PAM)有效改善山东沿海滩涂盐碱土;倪海峰等^[17]联合施用 γ -聚谷氨酸与有机酸土壤调理剂显著改善了黄河三角洲盐碱土,这些研究均为 CMC 在控盐与盐碱地改良方面的应用提供了有效支持。

上述研究说明 CMC 能够通过改变土壤孔隙结构来提高土壤持水能力与抑制土面蒸发,具有保水控盐、改良滨海壤砂质盐碱土的巨大潜力。然而,现阶段对于施加 CMC 壤砂土水分运动及水力参数的研究不足,这就阻碍了 CMC 在滨海盐碱地改良中的应用。为此,本研究开展了室内一维垂直入渗试验,分析不同 CMC 施量对水分入渗特性、水分分布规律和土壤水力参数的影响,从而为 CMC 在滨海盐碱地改良中的应用提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土样取自山东省农业高新技术示范基地田间试验小区(118.95°E, 36.93°N),采集表层 0~20

cm 的土壤，用环刀法测定土壤容重。将取回的土壤经干燥、风干，过 2 mm 筛后备用。利用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000) 进行机械组成测定，对照国际制土壤质地分类标准，该土壤为壤砂土。土壤基本物理性质如表 1 所示。土壤中初始含盐量介

于 3.00~6.00 g·kg⁻¹ 之间，属于轻中度盐碱土^[18]，土壤八大离子 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻ 含量分别为 0.03、1.44、0.03、0.09、2.53、0.07、0.21 g·kg⁻¹，土壤盐分组成以氯化钠为主，Cl⁻/SO₄²⁻ 达到 10 以上。

表 1 土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil

土地类型 Soil type	土壤颗粒组成/% Soil particle composition			γ_d / (g·cm ⁻³)	θ_l / (cm ³ ·cm ⁻³)	θ_s / (cm ³ ·cm ⁻³)	S_i / (g·kg ⁻¹)	pH
	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay					
	盐碱土	73.93	23.04					

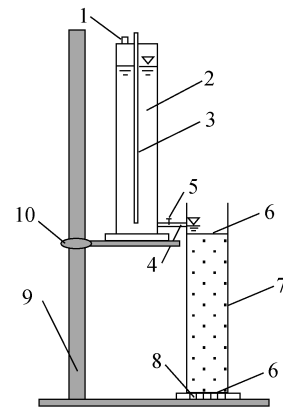
注： γ_d 、 θ_l 、 θ_s 、 S_i 分别表示土壤容重、初始含水量、饱和含水量和初始含盐量。Note: γ_d 、 θ_l 、 θ_s 、 S_i represent soil bulk density, initial water content, saturated water content and initial salt content, respectively.

1.2 试验设计

试验于 2019 年 7 月在西安理工大学省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室进行。CMC 施量根据吴军虎等^[11]与哈丽代姆·居麦等^[12]的前期研究，设置 5 个梯度 (0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 g·kg⁻¹)，CMC 施加方式为混施 (CMC 与干土按比例均匀混合)，每个处理设置 3 次重复，共计 15 次模拟入渗试验。试验系统主要包括：供水装置 (马氏瓶)、入渗装置 (有机玻璃土柱) 和固定支架。有机玻璃土柱高为 50 cm，内径为 5 cm，底部布满直径为 3 mm 的通气孔。马氏瓶主要为试验提供稳定的入渗水头，其高为 50 cm，内径为 5 cm。在土柱底部铺一层滤纸，将土样每 5 cm 一层，按 1.40 g·cm⁻³ 的容重装入土柱中，并在层与层之间打毛，以避免土壤分层，靠近边壁的位置用木棒多次搅拌并压实，避免填装土体出现脱壁现象。装土完毕后，在土体顶部放置一层滤纸，保证水分均匀入渗，并防止入渗时对土面的冲溅。控制积水深度为 2 cm，采用秒表按照先密后疏的原则定时记录马氏瓶水位和土柱湿润锋深度。当湿润锋深度到达 30 cm 时，停止供水，并马上吸出表面积水，再按照 0、5、10、15、20、25、30 cm 的深度分层取土，放入提前准备好的铝盒。采用烘干法 (105 ± 5℃) 测定土壤质量含水量，其与土壤容重的乘积即为土壤体积含水量。

1.3 入渗模型

为了研究 CMC 对土壤入渗模型参数的影响，



注：1. 橡胶塞 2. 马氏瓶 3. 进气管 4. 供水管；5. 止水夹 6. 滤纸 7. 土柱 8. 透气孔 9. 固定支架 10. 调节器。Note: 1. Rubber stopper, 2. Markov bottle, 3. Air inlet pipe, 4. Water supply pipe, 5. Water stop clip, 6. Filter paper, 7. Soil column, 8. Air hole, 9. Fixed bracket, 10. Regulator.

图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

利用 Philip 和 Green-Ampt 入渗模型对不同施量 CMC 的入渗特性进行分析。Philip 入渗模型^[19]的累积入渗量表达式为：

$$I = S t^{0.5} \quad (1)$$

式中， I 为累积入渗量，cm； S 为吸渗率，cm·min^{-0.5}； t 为入渗时间，min。

Green-Ampt 模型^[20]中入渗率可以表示为：

$$i = K_s \frac{Z_f + S_f + H_0}{Z_f} \quad (2)$$

累积入渗量和概化湿润锋深度之间的关系为:

$$I = (\theta_s - \theta_i) Z_f \quad (3)$$

当入渗时间较短, 积水深度较小, 基质势占主导优势的情况下, 式(2)可以简化为:

$$i = K_s \frac{S_f}{Z_f} \quad (4)$$

雷志栋等^[21]将湿润区某种平均的或有效的土壤水扩散率表示为:

$$\bar{D} = \frac{K_s S_f}{\theta_s - \theta_i} \quad (5)$$

式中, θ_s 为土壤饱和含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_i 为土壤初始含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; H_0 为土柱表面积水深度, cm ; S_f 为湿润锋面吸力, cm ; K_s 为土壤饱和导水率, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; Z_f 为概化湿润锋深度, cm ; \bar{D} 为土壤水扩散率, $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

1.4 统计分析

采用 Excel 进行各指标的计算和绘图, SPSS 22.0 软件进行统计分析, 对各处理的指标进行单因素方差分析, 若存在差异 ($P < 0.05$), 则利用最小显著性差异法 (LSD) 进行多重比较, 不同大写字母表示在 $\alpha = 0.05$ 显著性水平上存在差异。采用决定系数 (Determination coefficient, R^2)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对值误差 (Mean Absolute Error, MAE) 等 3 个指标评价模型模拟的精度及可靠性。当 R^2 越接近 1 表明模拟精度越高, RMSE 和 MAE 越接近 0 表明实测值与模拟值越接近。通过计算变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 评价 CMC 对土壤水力参数影响程度。

2 结果与讨论

2.1 CMC 施量对累积入渗量的影响

图 2 为 CMC 施量对入渗过程的影响。由图 2a 可以看出, 入渗初期累积入渗量的差距不大, 入渗时间超过 90min 之后, CMC 对累积入渗量的影响开

始显著, 这主要是因为入渗初期土壤比较干燥, 土壤基质势起到主导作用, 而 CMC 需要一定时间与水分子进行融合才能发挥效果, 因此累积入渗量差异不大^[22-23]。随着入渗时间的增加 (90 min 后), 土壤表层湿度增加, CMC 与表层土壤进行充分作用, 其凝聚性能充分显现, 使得不同 CMC 施量处理土壤累积入渗量逐渐拉开差距^[11]。观察发现, 施加 CMC 土壤的累积入渗量增加速度明显低于对照处理, 在相同入渗时间, 施加 CMC 土壤的累积入渗量更低。入渗 240 min 时, CMC 施量 0.1、0.2、0.4 及 0.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的累积入渗量相比对照, 分别降低了 30.07%, 37.37%, 58.98% 及 62.63%, 这与吴军虎等^[11]的试验结果一致。这主要是因为 CMC 分子含有亲水性的羧基和羟基, 具备良好的吸水能力, 能够与土壤中的水分子融合形成水凝胶, 从而增加水的黏度, 降低了土壤水分的入渗速率^[10]。这说明对于施加 CMC 土壤短时间内难以入渗较多水分, CMC 的施用应该配合少量多次的灌溉方式。图 2b 为到达预设深度 (30 cm) 的最终累积入渗量。由图可知, 当达到预设深度时, CMC 施量 0.1、0.2、0.4 及 0.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的累积入渗量相比对照, 分别增加了 4.90%, 8.48%, 12.35% 及 15.17%, 这主要是因为 CMC 改善了土壤孔隙结构, 增加了土壤小孔隙数量, 进而提高各层土壤的持水能力, 增加了土壤累积入渗量^[24]。这说明施加 CMC 能够使更多水分进入土壤小孔隙, 这对于土壤盐分的充分淋洗非常有利。

2.2 CMC 施量对土壤湿润锋运移的影响

图 3 为 CMC 施量对湿润锋推进过程的影响, 从图中可以看出, 湿润锋推进速度随着 CMC 施量的增加而逐渐降低。相同入渗时间下, 施加 CMC 土壤湿润锋深度明显低于对照处理。在入渗 240 min 时, 施加 0.1、0.2、0.4 和 0.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CMC 土壤的湿润锋推进距离相比对照, 分别减小了 23.33%, 33.33%, 56.67% 和 60.33%。在达到预设湿润锋深度 (30 cm) 时, 施加 0.1、0.2、0.4、0.6 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CMC 土壤所用的时间相比对照分别增加 61.90%、109.08%、392.61% 和 604.73%。这主要是由于 CMC 良好的亲水特性, 与水接触后形成了凝胶, 增加了水的黏滞性, 从而降低了土壤湿润锋的推进速度^[17]。这与哈丽代姆·居麦等^[12]的研究结果一致, 说明 CMC 能够有效减缓土壤水分向下层扩散, 将更多的

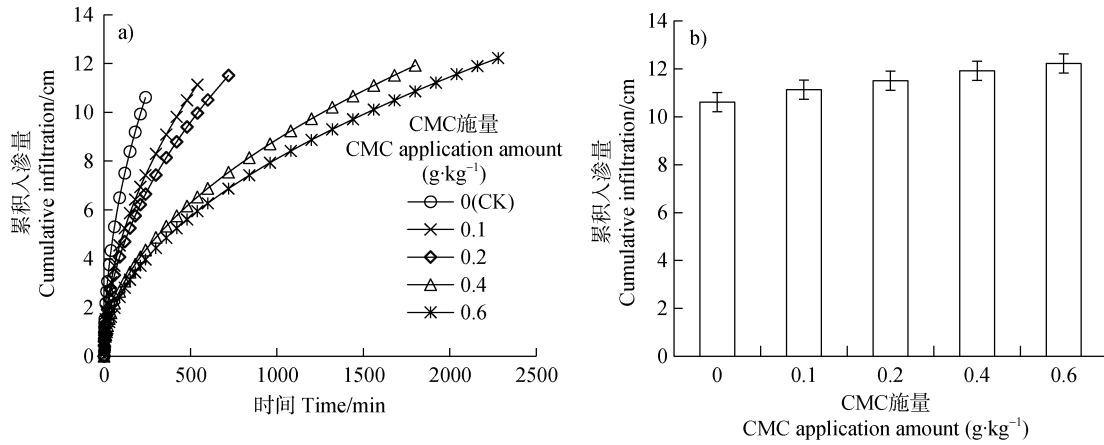


图 2 CMC 施量对入渗过程的影响

Fig. 2 Effect of CMC application amount on the infiltration process

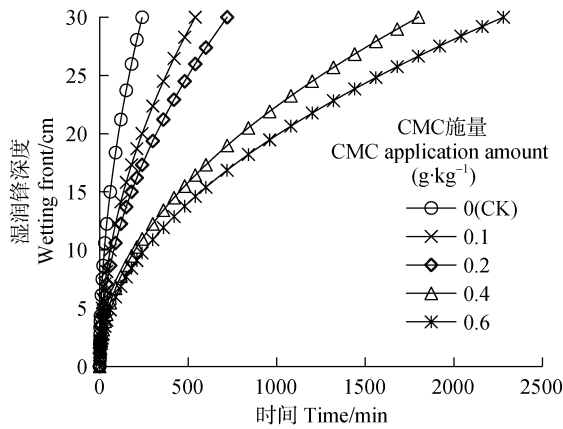


图 3 CMC 施量对湿润锋推进过程的影响

Fig. 3 Effect of CMC application amount on the changing process of wetting front

水分保持在上层土壤中，减小上层中的土壤盐分浓度，有效控制作物根际土壤水盐环境。

2.3 CMC 施量对入渗模型参数的影响

吸渗率 S 是指土壤依靠毛管吸收或释放溶液的能力，是反映土壤入渗能力的重要指标^[7]。根据入渗数据拟合出 Philip 公式中的吸渗率，结果如表 2 所示。通过对比分析发现，随 CMC 施量的增大，吸渗率逐渐减小，并从 $0.685 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ 减小至 $0.256 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$ ，表明 CMC 处理使毛管力对土壤中水分的吸收能力减弱，降低了土壤水分入渗能力，这与吴军虎等^[11]研究施加 CMC 对土壤水分入渗过程的影响结果相一致，说明 CMC 能够降低土壤毛管孔隙对土壤盐溶液的吸附，有利于提高单位水体的盐分淋洗效率。为了更好地评价 CMC 对吸渗率 S 的影响，建立了两者的关系（图 4a），结果表明两者之间可以用二次多项式进行描述。

表 2 Philip 与 Green-Ampt 模型参数拟合结果

Table 2 Fitted results of two infiltration formula parameters

CMC 施量 CMC application amount/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Philip 模型 Philip model		Green-Ampt 模型 Green-Ampt model	
	吸渗率 Adsorptivity S / ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-0.5}$)	决定系数 R^2 Determination coefficient	模型参数 Model parameters $K_s\cdot S_f$ / ($\text{cm}^2\cdot\text{min}^{-1}$)	决定系数 R^2 Determination coefficient
0 (CK)	0.685	0.993	0.633	0.954
0.1	0.479	0.985	0.467	0.965
0.2	0.459	0.988	0.408	0.959
0.4	0.261	0.989	0.149	0.968
0.6	0.256	0.986	0.096	0.952

土壤水扩散率也是反映土壤水分运动的重要指标。雷志栋等^[21]曾定义 \bar{D} 表示湿润区某种平均的或有效的土壤水扩散率。由式 (5) 可知 \bar{D} 与 $K_s S_f$ 的值呈正比, 参数 $K_s S_f$ 的变化直接反应土壤水扩散率的变化, 利用入渗数据反推 Green-Ampt 模型参数, 结果如表 2 所示。随着 CMC 施量的增加, $K_s S_f$ 逐渐减小, 从 $0.633 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ 减小至 $0.096 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$,

这与湿润锋降低结果一致, 说明 CMC 能够降低土壤扩散率, 将更多的水分留滞在作物根系层, 从而改善作物根系层土壤水盐环境, 促进作物生长。为了更好地描述 CMC 对土壤扩散率的影响, 建立 CMC 施量与 \bar{D} 的关系, 如图 4b 所示。从图中可以看出, 土壤水扩散率与 CMC 施量之间符合指数函数关系。

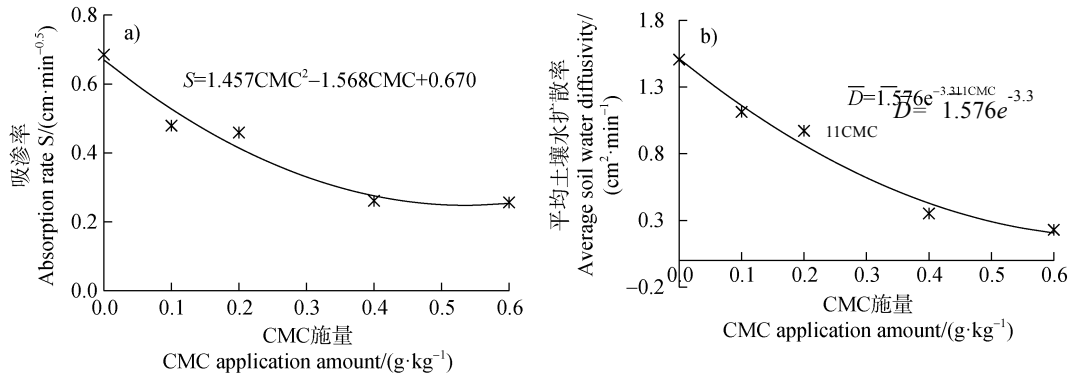


图 4 CMC 施量对吸渗率和土壤扩散率的影响
Fig. 4 Effect of CMC application amount on the adsorptivity and the diffusivity

2.4 CMC 施量对土壤剖面水分分布特征的影响

为了分析 CMC 对土壤水分分布的影响, 将不同 CMC 施量对土壤剖面水分的分布情况绘于图 5。由图 5 可以看出, CMC 能够有效提高土壤剖面含水量, 施加 0.1 、 0.2 、 0.4 和 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ CMC 土壤剖面平均含水量相对对照, 分别增加了 0.72% 、 1.45% 、 2.70% 和 3.74% 。这与 Ning 等^[7]施加 CMC 土壤水分分布规律一致。这主要是因为 CMC 和水分子形成的水凝胶, 增加了水的黏度和水稳性团聚体数量,

提高了土壤的持水能力, 增加了持水量^[15, 17], 这说明施加 CMC 能够有效改善土壤结构, 增强土壤保水能力, 维持较好的作物生境。

2.5 CMC 施量对土壤水力参数的影响

2.5.1 土壤参数的校准与验证 为了探究 CMC 对土壤水力参数的影响, 选择广泛使用的 van Genuchten 模型进行评价。在 Hydrus-1D 软件中根据实测土壤颗粒组成与容重确定土壤水力参数初始值, 以 cm 为单位对土柱进行网格划分, 在 0 、 5 、 10 、 15 、 20 、 25 、 30 cm 位置处布设观测点, 结合累积入渗量数据对模型中水力参数 (θ_r 、 θ_s 、 α 、 n 、 K_s) 进行反演校准, 初始参数值与最终参数值见表 3。利用土壤含水量、湿润锋的实测值对模型验证, 并选择决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、平均绝对值误差 MAE 等 3 个指标对模拟结果进行评价。从表 3 中可以看出, CMC 施量对土壤参数有着不同的影响。其中, 滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 和进气吸力倒数 α 均随 CMC 施量的增加而增大, 而形状系数 n 和饱和导水率 K_s 却随着 CMC 施量的增加而减少。 θ_r 、 θ_s 和 α 增加的原因在于 CMC 本身具有长链型分子结构^[6, 11], 在土壤中形成相互交错网状结构, 该结构使土壤颗粒与水分子结合更加紧密, 增加了

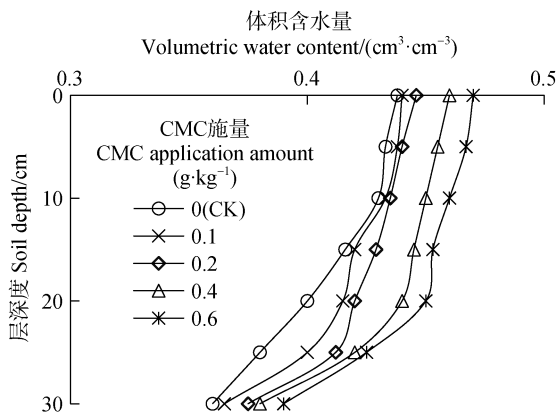


图 5 不同 CMC 施量土壤剖面含水率分布特征
Fig. 5 Effect of CMC application amount on the characteristics of the water content of soil profile

水分子脱离土壤束缚的阻力，从而增加土壤的持水能力^[9]。形状系数减小原因是土壤大孔隙增多，CMC 将细小的土壤颗粒聚合在一起形成了更多大的团聚体^[10]，从而使大孔隙增多导致了形状系数 n 的减小。导水率减少的原因，CMC 与水相融后形成的凝胶大大增加了水的黏滞性，使得水在土壤中运移能力大幅减弱^[24]。图 6、图 7 分别显示了含水率、湿润锋实测值与模拟值的对比结果，误差分析发现土壤含水率和湿

润锋的决定系数、均方根误差、平均绝对误差分别为 0.883~0.953、0.006~0.012 和 0.005~0.011；0.983~0.992、0.383~1.072 和 0.372~0.961。其产生误差的原因主要为：（1）模型中设定土体各向同性且均匀分布，而实际并不能够完全满足；（2）观测和取样过程中不可避免产生一定的误差。虽然模拟值和实测值之间存在一定的误差，但根据 Santhi 等^[25]的研究可以看出本研究中的模拟结果能够满足精度要求，可以应用

表 3 土壤的水力参数校准结果

Table 3 Calibration results of soil hydraulic parameters

CMC 施量 CMC Application amount / (g·kg ⁻¹)	滞留含水率 θ_r Residual soil water content / (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率 θ_s Saturated soil water content / (cm ³ ·cm ⁻³)	进气吸力倒数 α Reciprocal of air-entry / (cm ⁻¹)	形状系数 n Shape factor (-)	饱和导水率 K_s Saturated hydraulic conductivity / (cm·min ⁻¹)
初始值	0.035	0.394	0.042	1.566	0.083
0 (CK)	0.012	0.444	0.010	1.518	0.016
0.1	0.012	0.452	0.011	1.514	0.014
0.2	0.014	0.450	0.012	1.510	0.012
0.4	0.014	0.463	0.011	1.401	0.004
0.6	0.016	0.472	0.013	1.402	0.003

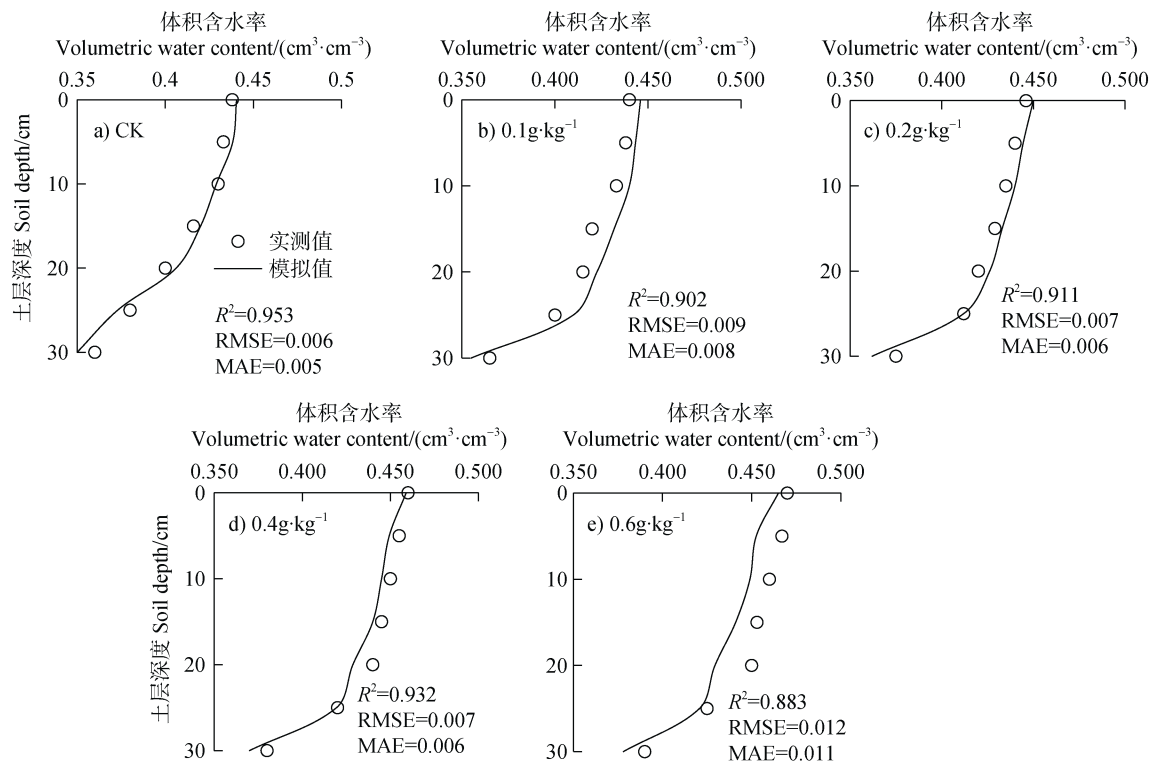


图 6 土壤含水率分布的模拟与实测值对比

Fig. 6 Comparison of the simulated and measured soil water content distribution

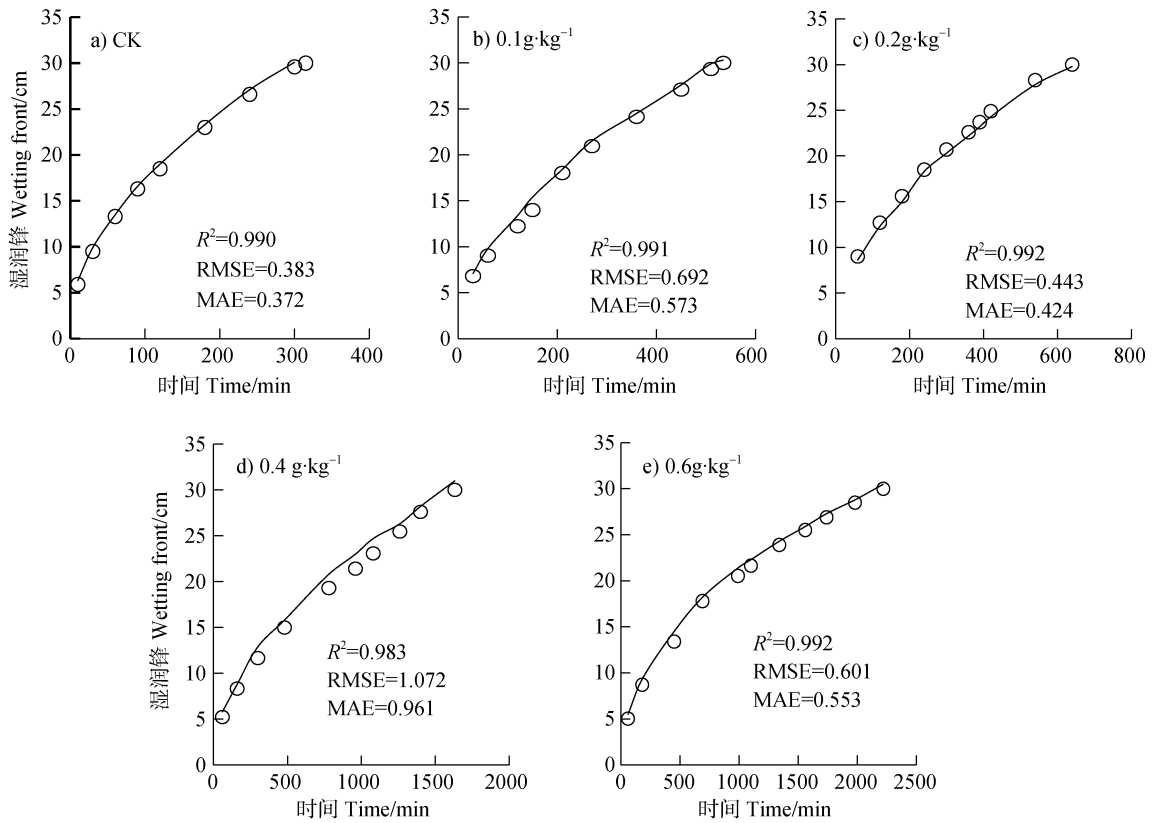


图 7 湿润锋的模拟与实测值对比

Fig. 7 Comparison of the simulated and measured wetting front

于模拟施加 CMC 土壤水盐运移研究，这就为掌握施加 CMC 土壤水盐运移规律提供了理论参考。

2.5.2 CMC 施量对土壤水力参数的影响 为了更好地评价 CMC 施量对土壤水力参数的影响程度，

通过计算变异系数 CV 进行评价，计算结果如表 4 所示。通过对表中数据的分析发现，CMC 对水力参数影响程度由高到低的顺序为：饱和导水率>进气吸力倒数>滞留含水率>形状系数>饱和含水率，其变

表 4 不同 CMC 处理水力参数的变异系数

Table 4 Coefficient of variation of hydraulic parameters treated with different CMC

水力参数 Hydraulic parameters	滞留含水率 θ_r Residual soil water content / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 θ_s Saturated soil water content / ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	进气吸力倒数 α Reciprocal air-entry / (cm^{-1})	形状系数 n Shape factor (-)	饱和导水率 K_s Saturated hydraulic conductivity / ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
最大值 Maximum	0.015	0.465	0.013	1.518	0.016
最小值 Minimum	0.012	0.443	0.001	1.401	0.003
平均值 Mean	0.013	0.452	0.011	1.469	0.009
标准差 Standard deviation	0.001	0.009	0.001	0.055	0.007
变异系数 CV / %	8.36	2.27	11.05	4.23	68.42

异系数分别为：68.42%、11.05%、8.36%、4.23%和 2.27%，前两项为中等变异（ $10\% < CV < 100\%$ ），其他三项均小于 10%，为弱变异性^[26]。由此可以得出，土壤中施加 CMC 需考虑其对饱和导水率、进气吸力倒数的影响，可以忽略其对滞留含水率、形状系数、饱和含水率的影响，这就为施加 CMC 水盐运移模型参数的选定提供了有效说明。

3 结 论

本文通过一维入渗模拟试验研究了 CMC 对滨海壤砂土的水分入渗、水分分布以及土壤水力参数的影响。结果表明，CMC 虽然降低了土壤的湿润锋推进速率，但能够通过改善土壤孔隙结构来增加累积入渗量，0.1, 0.2, 0.4, 0.6 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ CMC 施量的最终累积入渗量相对增加了 4.90%，8.48%，12.35%和 15.17%。随着 CMC 施量的增加，Philip 模型参数吸渗率 S 和 Green-Ampt 模型参数 $K_s h_f$ 值均减少，吸渗率 S 与 CMC 施量之间可用二次多项式描述，平均土壤水扩散率 \bar{D} 与 CMC 施量之间存在较好的指数函数关系。CMC 增强了土壤的持水能力。CMC 含量与滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、进气吸力倒数 α 呈正相关关系，与饱和导水率 K_s 、形状系数 n 呈负相关关系。CMC 对水力参数影响程度的顺序依次为：饱和导水率、进气吸力倒数、滞留含水率、形状系数、饱和含水率，前两项为中等变异，后三项为弱变异。研究结果充分说明了 CMC 具有保水控盐的性能，为合理应用 CMC 改良滨海盐碱土提供了理论依据。

参考文献 (References)

- [1] Wu Y Z, Shan L P, Guo Z, et al. Cultivated land protection policies in China facing 2030: Dynamic balance system versus basic farmland zoning[J]. *Habitat International*, 2017, 69: 126—138.
- [2] Li H, Zhang X L, Zhang X, et al. Utilization benefit of cultivated land and land institution reforms: Economy, society and ecology[J]. *Habitat International*, 2018, 77: 64—70.
- [3] Zhao W W. Arable land change dynamics and their driving forces for the major countries of the world[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (20): 6452—6462. [赵文武. 世界主要国家耕地动态变化及其影响因素[J]. *生态学报*, 2012, 32 (20): 6452—6462.]
- [4] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China[J]. *Geoderma*, 2019, 349: 25—35.
- [5] Hou M M, Xu R, Lin Z Y, et al. Vertical characteristics of anaerobic oxidation of ammonium (anammox) in a coastal saline-alkali field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104531.
- [6] Zeng X D, Liang Y Q, Lin L W, et al. Effect of sodium carboxymethyl cellulose on acid soil improvement and rice growth[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009, 36 (11): 69—70. [曾晓舵, 梁玉清, 林兰稳, 等. 羧甲基纤维素钠对酸性土壤改良及水稻生长效应[J]. *广东农业科学*, 2009, 36 (11): 69—70.]
- [7] Ning S R, Jumai H D M, Wang Q J, et al. Comparison of the effects of polyacrylamide and sodium carboxymethylcellulose application on soil water infiltration in sandy loam soils[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2019, 6869454: 1—7.
- [8] Qiu Z X, Zhang R B, Qiu H X, et al. Effects of superabsorbents containing montmorillonite and polysaccharide on soil physical properties[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013 (6): 11—16. [邱朝霞, 张若冰, 邱海霞, 等. 含蒙脱土和多糖的保水剂对土壤物理性质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013 (6): 11—16.]
- [9] Xi Y Q, Zhao Y, Li S Y. Effects of three kinds of soil amendments on shear strength of aeolian soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (6): 1401—1410. [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.]
- [10] Li H J, Wang Q J, Tao W H, et al. Effects of different amendments on the yield of surface runoff and loss of nutrients along loess slope soybean farmland[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15 (6): 117—125. [李虎军, 王全九, 陶汪海, 等. 不同改良剂对黄土坡耕豆地水土及氮磷流失的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15 (6): 117—125.]
- [11] Wu J H, Tao W H, Wang H Y, et al. Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (2): 117—123. [吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (2): 117—123.]
- [12] Junmai H D M, Ning S R, Wang Q J, et al. Comparative analysis of the effects of PAM and CMC on soil infiltration and evaporation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (1): 121—127, 134. [哈丽代姆·居麦, 宁松瑞, 王全九, 等. 施加 PAM 与 CMC 对土壤水分入渗与蒸发特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (1): 121—127, 134.]

- [13] Liang J P, Shi, W J, He Z J, et al. Effects of poly- γ -glutamic acid on water use efficiency, cotton yield, and fiber quality in the sandy soil of southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*, 2019, 218: 48—59.
- [14] Albalasmeh A A, Hamdan E H, Gharaibeh M A, et al. Improving aggregate stability and hydraulic properties of Sandy loam soil by applying polyacrylamide polymer[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: 104821.
- [15] Cao Y T, She D L. Effects of biochar and PAM application on saline soil hydraulic properties of coastal reclamation region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (11): 3684—3690. [曹雨桐, 余冬立. 施用生物炭和聚丙烯酰胺对海涂围垦区盐碱土水力性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (11): 3684—3690.]
- [16] Alim A B L T, Yao H Z, Song Y F, et al. Effects of soil structure improvement on chlorophyll fluorescence parameters and yield of rice in a coastal reclamation region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (10): 3435—3442. [阿力木·阿布来提, 姚怀柱, 宋云飞, 等. 海涂土壤结构改良对水稻叶绿素荧光参数和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (10): 3435—3442.]
- [17] Ni H F, Zhu Y D, Liu S T, et al. Effects of water retention agent and organic acid soil conditioner on saline-alkali soil improvement and wheat yield[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52 (4): 121—125. [倪海峰, 朱尤东, 刘树堂, 等. 保水剂及有机酸土壤调理剂对盐碱地的改良效果及小麦产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52 (4): 121—125.]
- [18] Chen Y Y, Wang X Y, Wu H X, et al. Adsorption and migration mechanism of enteromorpha prolifera biochar on Na^+ in coastal saline-alkaline soil[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49 (S1): 85—92. [陈媛媛, 王翔宇, 吴海霞, 等. 浒苔生物炭对滨海盐碱土 Na^+ 的吸附迁移机制研究[J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2019, 49 (S1): 85—92.]
- [19] Philip J R. The theory of infiltration: 1. the infiltration equation and its solution[J]. *Soil Science*, 1957, 83 (5): 345—358.
- [20] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: I. Flow of air and water through soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1911, 4: 1—24.
- [21] Lei Z D, Yang S X, Xie S C. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. [雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.]
- [22] Cheng S, Zeng W, Liu X M, et al. Anti-evaporation performance of water in soil of superabsorbent resin with fast water absorption rate[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2020, 231 (6): 1—15.
- [23] Qiao Y X, Wu J, Xu Y Z, et al. Remediation of cadmium in soil by biochar-supported iron phosphate nanoparticles[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 515—522.
- [24] Chen M. Effects of HA, ATP and CMC on water and soil nutrients loss and soybean growth traits on loss slope land[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018. [陈明. HA、ATP 及 CMC 对坡面水土养分流失及大豆生长性状的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.]
- [25] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37 (5): 1169—1188.
- [26] Wang J, Niu W Q, Zhang W Q, et al. Spatial variability of soil nutrients in topsoil of cultivated land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36 (15): 37—46. [王婕, 牛文全, 张文倩, 等. 农田表层土壤养分空间变异特性研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36 (15): 37—46.]

(责任编辑: 檀满枝)