

羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响

吴军虎^{1,2}, 陶汪海², 王海洋², 王全九²

(1. 中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100;
2. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘要: 土壤改良剂的应用研究对改善土壤环境, 促进作物生长有着重要意义。该文通过向土壤中添加不同质量的羧甲基纤维素钠 (sodium carboxyl methyl cellulose, 简称 CMC), 研究了不同含量的 CMC 对土壤团粒结构及水分运动的影响。结果表明: 随着 CMC 含量的增大, 土壤水稳性团聚体含量增大, 土壤分形维数减小, 土壤黏粒和粉粒比例减少, 砂粒比例增多, 黏粒和粉粒均与土壤分形维数呈正相关关系, 砂粒与分形维数呈负相关关系, 黏粒含量对土壤分形维数影响最为显著, 土壤中 $<0.1\text{ mm}$ 的颗粒含量减少, 而 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的颗粒含量均有不同程度的增加; 随 CMC 含量的增大, 土壤的入渗能力减弱, 稳定入渗率显著减小, Philip 公式中吸渗率减小, Kostiakov 公式中的经验系数减小, 经验指数增大; 随着 CMC 含量的增大, 土壤的持水能力增强, van Genuchten 公式中土壤滞留含水率、饱和含水率及与进气值相关的系数均有所增大, 形状系数逐渐减小。该研究对可为 CMC 的田间土壤改良应用提供理论依据。

关键词: 土壤; 水分; 土壤改良剂; 羧甲基纤维素钠; 团粒结构; 分形维数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.02.017

中图分类号: S152.4; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-02-0117-07

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.

Wu Junhu, Tao Wanghai, Wang Haiyang, 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 (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 117-123. (in Chinese with English abstract)

0 引言

羧甲基纤维素是天然纤维素经碱化反应和醚化反应改性得到的一种具有羧甲基结构的纤维素醚衍生物, 分子链上的羧基可以成盐, 而具有实用价值的通常是其钠盐, 即羧甲基纤维素钠 (Na-CMC), 所以习惯上 CMC 就是指羧甲基纤维素钠^[1-2]。CMC 的水溶液具有很好的增稠、悬浮、黏合、持水等特性, 因此广泛应用于石油、地质、食品、纺织、印染、造纸、陶瓷、化妆品、医药等工业, 有工业“味精”之称^[3-7]。CMC 通常用天然纤维素与氢氧化钠及一氯醋酸反应后制得的一种阴离子型高分子化合物^[8]。其结构式和天然纤维的结构式相似, 在纤维素 D-葡萄糖糖环上的羟基 (—OH) 上的氢原子被羧甲基 (—CH₂COONa) 所取代, 由于羧甲基团的体积比氢原子大的多, 使得大分子间的平均距离扩大, 故其易溶于水, 成为透明的黏稠溶液。分子量大于 17 000, 质量分数为 1% 的水悬浮液 pH 值在 6.5~8.5 之间, 不溶于乙醇、乙醚, 丙酮、氯仿等有机溶剂^[9-10]。

由于亲水基团羧甲基的存在使得 CMC 非常容易与

水结合, 在氢键与范德华力的作用下高分子聚合物相互交错形成网状结构, 从而可以与大量的水结合形成水凝胶。因此如果在土壤中加入 CMC, 便可以结合土壤中的水分, 阻碍其蒸发, 随着 CMC 被微生物降解水分又会重新释放到土壤中^[11]。CMC 来源丰富, 易被土壤中微生物所降解, 且无毒, 因此可以将其作为土壤改良剂^[12-13]。已经有学者对 CMC 的土壤改良效应进行了研究, 邱朝霞等^[14]研究了 CMC 对土壤物理性质的影响, 发现 CMC 可以提高土壤非毛管孔隙度。杨雪芹等^[15]用不同浓度的 CMC 处理土壤(娄土), 发现处理后可显著增加土壤对磷素的吸附。曾晓舵等^[16]将 CMC 作为酸性土壤改良剂进行盆栽水稻试验, 结果表明施用羧甲基纤维素钠对酸性土壤有改良作用, 可提高土壤 pH 值和有效磷养分含量; 张双兰等^[17]研究了 CMC 对可奇思种子 (高羊茅品种) 发芽及生长的影响, 结果表明, 经 CMC 处理后, 其种子发芽率、生物量及产量均显著增大。然而到目前为止关于 CMC 的土壤改良效应的内在机理方面的研究依然较少, 本文就 CMC 对土壤团粒结构分布及水分运动特性方面的影响作进一步研究, 以期能更好的将 CMC 应用于土壤改良, 从而为发展农业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土样取自中科院武农业生态试验站田间试验小区 (35°12'N、107°40'E), 用环刀法测得其容重为 1.31 g/cm³, 将取回的土样风干, 过 2 mm 筛后备用。利

收稿日期: 2014-12-22 修订日期: 2015-01-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51239009); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研计划项目 (2010JS076); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金 (K318009902-1419); 陕西省教育厅科研计划项目 (14JK1518); 陕西省优势学科专项资金建设项目

作者简介: 吴军虎, 男, 陕西, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程与水文水资源方面的研究。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。

Email: wujunhu@126.com

用英国马尔文仪器有限公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪对其机械组成进行测定, 根据国际制土壤质地分类标准, 黏粒、粉粒、砂粒体积分数分别为 3.47%、92.26%、4.27%, 属于粉砂质壤土。

1.2 试验方法

1.2.1 入渗试验

经过试验前初步研究, 发现当 CMC 与土壤质量比超过 3:1 000 时土壤入渗能力会变得十分微弱, 而当质量比小于 0.5:1 000 时又对土壤入渗几乎没有影响, 故本研究将 CMC 与土壤质量比设计为 0.5:1 000~3:1 000, 另设计不添加 CMC 的处理作为对照。进行试验时, 分别将 0、0.5、1、1.5、2、2.5、3 g 的 CMC 与 1 000 g 的土壤(干质量)混合均匀, 再分层(5 cm)将处理后的土壤装进内径 10 cm 的圆柱形有机玻璃土柱内, 层间刮毛, 装土高度为 30 cm, 容重为 1.31 g/cm³。试验供水系统为马氏瓶, 控制水头高度为 1 cm 左右, 试验过程中记录土柱湿润锋与马氏瓶读数。

1.2.2 土壤水分特征曲线试验

土壤水分特征曲线用日本 Kokusan 公司生产的 H-1400pF 土壤水分特征曲线测量系统测定, 将上述按不同 CMC 含量处理后的土壤, 分别按 1.31 g/cm³ 的容重装入离心机的配套环刀(体积为 100 cm³, 质量为 76 g)中, 称质量, 记录环刀与干土总质量。在装好土的环刀下垫 1 张滤纸, 然后放到纯水中充分饱和, 浸泡 48 h 使其充分饱和后称质量, 将盛有饱和土样的环刀放入样品杯, 测定土样在不同转速下的含水率, 设计测量系统的转速分别为 100、300、500、700、1 200、1 700、2 200、3 100、4 400、5 400、6 200、6 900 r/min(转速根据土壤基质势大小换算设定), 每次离心时间为 90 min, 每次离心结束后用称质量法计算土壤含水率。

1.2.3 土壤颗粒分析试验

待积水入渗试验结束以后, 分别从各个土柱中取适量的土样, 晾干、研磨再过 2 mm 筛后备用。分别取土样 0.5 g 于 100 mL 的烧杯中, 加入 10 mL 浓度为 10% 的双氧水, 在加热板上加热以去除土壤中的有机质, 待其充分反应之后再加入 10 mL 浓度为 10% 的盐酸, 加热煮沸以去除土壤中的碳酸盐, 待其充分反应后在烧杯加满蒸馏水, 静置 12 h 后再用注射器将上清液抽离, 再加入 10 mL 浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠分散剂, 把土样添加到进样器以后再用超声波分散 10 min^[18], 最后用英国马尔文 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测定。设定激光粒度分析仪的分析粒度分别为: 1) 1.9~2 mm、≥1.8~1.9 mm、≥1.7~1.8 mm、...、≥0.1~0.2 mm、<0.1 mm(从 0 开始以 0.1 mm 为步长以 2 mm 为上限); 2) 0.02~2 mm、≥0.002~0.02 mm、<0.002 mm(国际制分类标准)。

1.2.4 水稳性团聚体分析试验

土壤水稳性团聚体的测定用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 Wet Sieving Apparatus(湿筛分装置)进行测定, 测定步骤为: 向筛罐中装入 4 g 处理后的土样, 用喷雾器将土样弄湿后放置到孔径为 0.25 mm 筛罐支架上, 再放上已称质量的不锈钢水罐, 通过筛罐支架上的加水孔向不

锈钢水罐中加入足够的蒸馏水以浸没土壤, 再将筛罐支架固定到工作位置, 即锁定在第 2 个轴孔上, 接下来就可以开启马达, 将时间设置在 3 min, 待装置停止运行后将筛罐支架升高离开不锈钢水罐, 固定在第 1 个轴孔上让水充分漏出, 取出不锈钢水罐。重新放上另 1 已称质量的不锈钢水罐, 并加入 2 g/L 的六偏磷酸钠溶液, 重复第 1 次操作, 此次设定筛分时间为 8 min。最后将不锈钢水罐放入烘箱中, 充分烘干后称不锈钢水罐质量, 计算出从筛网漏入不锈钢水罐中的土壤质量, 将土壤总质量减去从筛网漏出的土壤质量即为粒径大于 0.25 mm 的水稳性团聚体质量, 再将该质量除以土壤总质量即可得出粒径大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量。

1.3 基本理论及指标计算

1.3.1 土壤颗粒体积分形维数

分形特征是土壤的一种客观属性, 由于用激光粒度分析仪测定土壤粒径分布是体积分数, 因此可以根据土壤的体积分布来表征土壤的分形特征, 且相比利用质量分布表征土壤分形更加可靠^[19-21], Catz 提出的体积分形模型为^[22]:

$$V_{d>d_i} = A \left[1 - \left(\frac{d_i}{k} \right)^{3-D} \right] \quad (1)$$

式中: d_i 为某一粒级的特征粒径; $V(d>d_i)$ 表示大于粒径 d_i 时的土壤体积; A 、 k 为描述形状和尺度的常数; D 为分形维数。

当 $d_i=0$ 时, 可以求出:

$$A = V_{d>0} \quad (2)$$

当 $d_i=d_{\max}$ (最大粒径)时易得:

$$k = d_{\max} \quad (3)$$

将式(2)、(3)带入式(1)有:

$$\frac{V_{d>d_i}}{V_{d>0}} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

不难分析出 $V_{d>d_i}/C_v$ 就是土壤颗粒大于某一特定粒径时的体积含量, 那么土壤颗粒小于某一特定粒径时的体积含量为:

$$\delta_{d<d_i} = 1 - \frac{V_{d>d_i}}{V_{d>0}} = \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (5)$$

再对两边取对数得:

$$\ln \delta_{d<d_i} = (3-D) \ln \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right) \quad (6)$$

故只要计算出 $\ln \delta_{d<d_i}$ 及 $\ln \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)$, 在坐标轴中将它

们的数据点拟合成一条直线, 则可根据拟合直线的斜率求出分形维数 D 。

1.3.2 入渗模型

入渗模型有理论模型与经验模型, 在理论模型中 Philip 公式形式简单, 应用广泛, 物理意义明确; 经验模型中 Kostikov 公式, 是描述土壤水分入渗过程中最常用的模型, 能较好地反映土壤入渗特征。故选择这 2 种常

用模型来反映 CMC 对土壤入渗特性的影响。

对于初始含水率均匀分布的均质土壤的一维垂直入渗问题, Philip 根据垂直入渗的级数解从而获得了 Philip 入渗模型, 其具体形式为:

$$I = St^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

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。

Kostiakov 入渗模型, 其具体形式为:

$$I = Kt^{1-\beta} \quad (8)$$

式中: β 为经验入渗指数, 反映土壤的入渗能力的衰减速度; K 为经验入渗系数, 表示入渗开始后第 1 个单位时段末的累计入渗量, 在数值上和第 1 个单位时段平均入渗速率相等, cm/min。在入渗的初始阶段, 参数 K 对土壤入渗能力起主导作用, 随着入渗过程的进行, 参数 β 是影响入渗能力的主要因素^[23]。

1.3.3 土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线本文采用的使用非常普遍的 van Genuchten 模型, 具体形式如下:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^{1-\frac{1}{n}} \quad (9)$$

式中: θ 为土壤含水率, cm³/cm³; θ_r 为滞留土壤含水率, cm³/cm³; θ_s 为饱和含水率, cm³/cm³; h 为土壤吸力, cm; α 是与进气值相关的参数; n 是形状系数。

2 结果与分析

2.1 CMC 对土壤团粒结构的影响

2.1.1 CMC 对水稳性团聚体及分形维数的影响

通常认为粒径大于 0.25 mm 的团聚体具有抵抗水破坏的能力, 在水中浸泡、冲洗不易崩解, 并对土壤肥力具有重要影响, 因此将粒径大于 0.25 mm 的团聚体称为水稳性团聚体^[24]。现对 CMC 含量与水稳性团聚体含量之间的关系进行分析, 如图 1 所示, 水稳性团聚体含量随 CMC 含量的增大从 3.36% 增加到 15.05%, 表现为二次函数关系, 拟合关系式见图 1 中。由此可知 CMC 可能会提高土壤肥力及抗侵蚀能力。

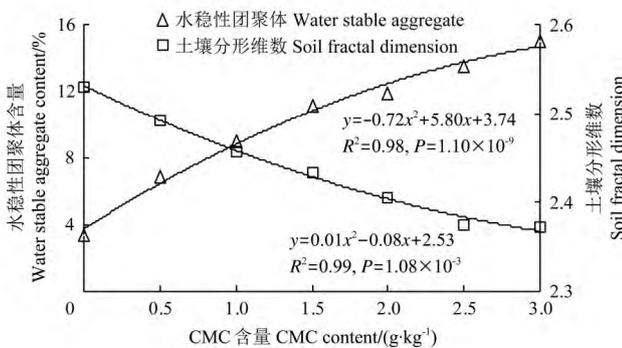


图 1 CMC 对土壤水稳性团聚体及分形维数的影响
Fig.1 Influence of CMC on soil water stable aggregate and soil fractal dimension

土壤分形维数反映着土壤的几何形态, 根据式 (6) 对土壤分形维数进行计算, 从而得到 CMC 含量与土壤分

形维数之间的关系, 计算结果及相关关系式如图 1 所示, 可以看出, CMC 含量与土壤分形维数符合二次函数关系, 随着 CMC 含量的增大, 土壤分形维数由 2.53 减小为 2.37。

2.1.2 CMC 对土壤颗粒分布的影响

对 CMC 处理过的土壤颗粒粒径分布特征进行测定, 结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出随着 CMC 含量的增大, <0.1 mm 的土壤颗粒含量由 85.59% 减小到 48.41%; ≥0.1~0.2 mm 范围内的土壤颗粒含量由 9.53% 增大到 22.56%; ≥0.2~0.3 mm 范围内的土壤颗粒含量由 2.14% 增大到 10.99%; ≥0.3~0.4 mm 范围内的土壤颗粒含量由 1.31% 增大到 6.69%; ≥0.4~0.5 mm 范围内的土壤颗粒含量由 0.84% 增加到 4.31%; ≥0.5~0.6 mm 范围内的土壤颗粒含量由 0.43% 增加到 2.81%; ≥0.6 mm 范围内的土壤颗粒含量由 0.16% 增加到 4.23%。

表 1 不同 CMC 添加量对土壤颗粒分布影响
Table 1 Influence of CMC added in soils on soil particle distribution %

粒级 Particle fraction/ mm	CMC 添加量 CMC added in soils/(g·kg ⁻¹)						
	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
<0.1	85.59	70.53	63.62	58.05	53.25	53.79	48.41
≥0.1~0.2	9.53	17.25	16.71	19.25	22.49	20.72	22.56
≥0.2~0.3	2.14	5.78	8.69	9.67	10.05	10.50	10.99
≥0.3~0.4	1.31	2.81	4.99	5.51	5.54	5.71	6.69
≥0.4~0.5	0.84	1.65	2.89	3.28	3.37	3.64	4.31
≥0.5~0.6	0.43	0.98	1.66	1.97	2.13	2.34	2.81
≥0.6	0.16	1.00	1.44	2.27	3.17	3.3	4.23

按国际制土壤分类标准将土壤质地进行测定, 将测定结果与 CMC 含量之间的关系绘于图 2, 从图中可以看出随 CMC 含量的增大, 土壤中的黏粒 (<0.002 mm)、粉粒 (≥0.002~0.02 mm) 比例均在减小, 砂粒 (≥0.02~2 mm) 比例增大, 其中黏粒比例由 3.47% 减小到了 0.84%, 粉粒比例由 86.19% 减小到了 61.27%, 而砂粒由 10.35% 增加到了 37.89%, 土壤主要成分还是粉粒, 仍然属于粉砂质壤土。

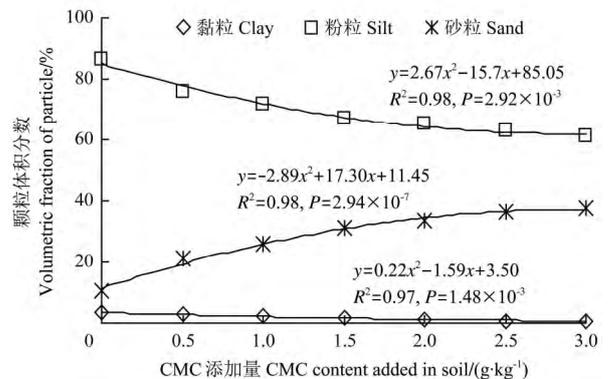


图 2 CMC 对土壤颗粒组成的影响
Fig.2 Influence of CMC on soil particle composition

2.1.3 土壤质地与分形维数关系

进一步对土壤质地与分形维数之间的关系进行分析, 土壤质地与分形维数之间的关系如图 3 所示, 黏粒、粉粒与分形维数为正相关关系, 砂粒与分形维数为负相

关系。进一步分析发现,虽然黏粒含量的变化很小,但其所对应的分形维数的变化是非常显著的,相比之下粉粒和砂粒在相同的变化范围内所对应的分形维数变化较小,因此可以认为对土壤分形维数影响最大的是黏粒。由于 CMC 具有减少黏粒的作用,因而导致了土壤的分形维数的减小。

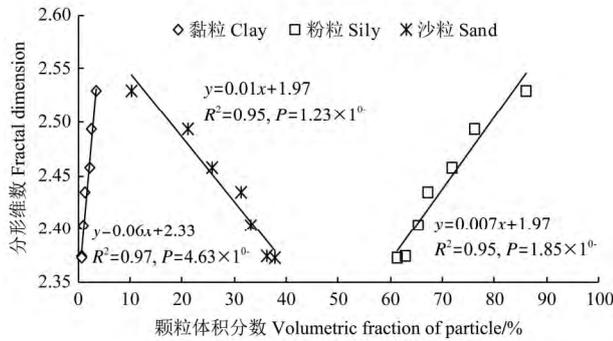


图3 土壤质地与分形维数之间的关系

Fig.3 Relationship between soil texture and soil fractal dimension

2.2 CMC 对土壤入渗特性的影响

2.2.1 CMC 对土壤累积入渗量及入渗率的影响

累积入渗量是入渗开始后一段时间内,通过地表单位面积入渗到土壤中的总水量。不同含量的 CMC 对土壤累积入渗量的影响如图 4 所示,可以看出,在入渗初期累积入渗量的差距不是很大,入渗时间超过 100 min 之后,CMC 对累积入渗量的影响开始显著,这是由于在入渗初期水势梯度很大 CMC 阻碍入渗的作用还没有体现出来,因此累积入渗量变化不大,但随着时间推移水势梯度逐渐变小 CMC 的阻渗作用逐渐显现出来,CMC 的添加比例越大,阻渗效果越明显,所以到 100 min 以后累积入渗量逐渐拉开差距,当入渗时间为 700 min 时,随 CMC 含量的增大,累积入渗量从 14.36 cm 减小到了 3.28 cm。可见 CMC 的阻渗作用十分显著,因此可考虑应用 CMC 防止土壤的深层渗漏。

入渗率是单位时间内通过地表单位面积入渗到土壤中的水量。不同含量 CMC 处理土壤的入渗率变化如图 4b 所示,可以看出,在入渗的起始阶段入渗率就有较大差距,说明 CMC 与水作用非常迅速,很快就在土壤中形成水凝胶增加了水的黏滞性,阻碍了水分的入渗。随着时间的推移土壤入渗率逐渐减小,CMC 对入渗率的影响更加显著,原因可能是在入渗的初始阶段土壤的水势梯度较大,水分在水势梯度的作用下水分迅速向土壤中入渗,此时 CMC 的阻渗作用相对较弱,随着入渗时间的增大水势梯度逐渐减小,从而使得 CMC 的阻渗作用更加明显。

进一步分析可以看出,随着 CMC 添加比例的增大,土壤达到稳定入渗率所需的时间越短并且所达到的稳定入渗率的数值也越小,本试验中入渗 400 min 以后,每个处理均能达到连续 5 个点入渗率基本相同,故取各组数据 400 min 以后连续 5 个点的入渗率平均值作为稳定入渗率,如图 4c,经 CMC 处理的土壤稳定入渗率由

0.0150 cm/min 减小到 0.0028 cm/min。

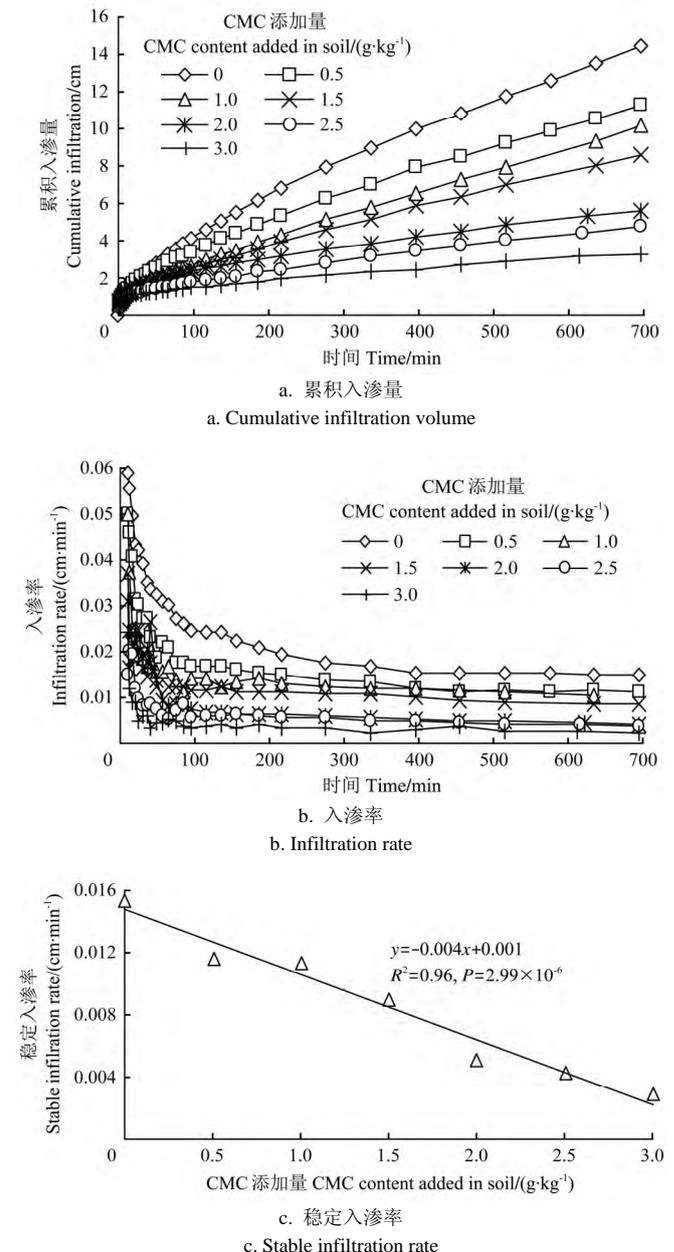


图4 CMC 对土壤累积入渗量、入渗率和稳定入渗率的影响

Fig.4 Influence of CMC on cumulative infiltration volume, infiltration rate and stable infiltration rate

2.2.2 CMC 对入渗模型参数的影响

依据实测数据,利用 Philip 公式及 Kostiakov 公式拟合入渗数据,结果见表 2。这 2 个入渗公式拟合效果都很好,决定系数都能达到 0.96 以上,均方根误差小于 0.5。进一步分析 CMC 含量与各入渗参数关系,对 Philip 公式,随 CMC 含量的增大,吸渗率从 0.46 减小为 0.13,为负相关关系,说明毛管力对土壤中水分的吸收能力减弱,分析原因可能由于 CMC 添加到土壤以后形成的水凝胶使水的黏滞性大大增强,从而导致毛管吸力对水的吸渗效果减弱;对 Kostiakov 公式,随 CMC 含量增大经验系数 K 趋于减小,这表明随着 CMC 在土壤中含量的增大土壤的初始入渗速率在减小,而经验指数 β 趋于增大,说明随着 CMC 含量的增大土壤入渗能力在减弱。

表 2 入渗公式参数拟合
Table 2 Infiltration formula parameters

CMC 添加量 CMC content added in soil/(g·kg ⁻¹)	Philip 公式 Philip formula			Kostiakov 公式 Kostiakov formula			
	吸渗率 Infiltration rate <i>S</i> / (cm·min ^{-0.5})	决定系数 Determination coefficient <i>R</i> ²	均方根误差 RMSE	经验系数 Empirical coefficient <i>K</i>	经验指数 Empirical coefficient <i>β</i>	决定系数 Determination coefficient <i>R</i> ²	均方根误差 RMSE
0	0.46	0.97	0.44	0.29	0.41	0.99	0.12
0.5	0.39	0.98	0.37	0.25	0.42	0.99	0.16
1.0	0.33	0.96	0.50	0.17	0.45	0.98	0.24
1.5	0.28	0.97	0.44	0.18	0.43	0.98	0.28
2.0	0.22	0.98	0.27	0.21	0.49	0.98	0.18
2.5	0.19	0.99	0.23	0.13	0.50	0.99	0.09
3.0	0.13	0.96	0.30	0.16	0.53	0.99	0.08

2.3 对土壤水分特征曲线的影响

土壤水吸力和土壤含水率之间的关系曲线就是土壤水分特征曲线，它反映了土壤水的能量和数量之间的关系，是研究土壤持水能力和水分运动的基本特性曲线。对不同 CMC 比例处理的土壤的土壤水分特征曲线的测定结果如图 5 所示，当含水率相同时，随 CMC 含量增大，土壤水吸力呈增大趋势，即土壤基质势降低，这说明 CMC 增加了土壤对水分的保持能力，使土壤中的水分不易因蒸发入渗等原因而损失，这是由于 CMC 的长链型分子结构，在土壤中相互交错形成网状，将土壤颗粒及水分子网在了一起，给水分子离开土壤增加了阻力，从而增强了土壤的持水能力。

用 van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线进行拟合，得到模型参数与 CMC 含量的关系如表 3 所示，可以看出，随 CMC 含量增大，土壤滞留含水率由 12% 增加到 14%，表明将 CMC 添加到土壤后，土壤在水势很低情况下可以保持有更多的水分；土壤饱和含水率在 42% 增加

到 46%，这可能是由于 CMC 添加到土壤后将细颗粒结合成较大团聚体，增加了土壤孔隙率，从而导致饱和含水率有所增加；与进气值有关的参数 α 随 CMC 含量的增大而增大，说明土壤的进气吸力逐渐减小；形状系数 n 随 CMC 含量的增大而减小。

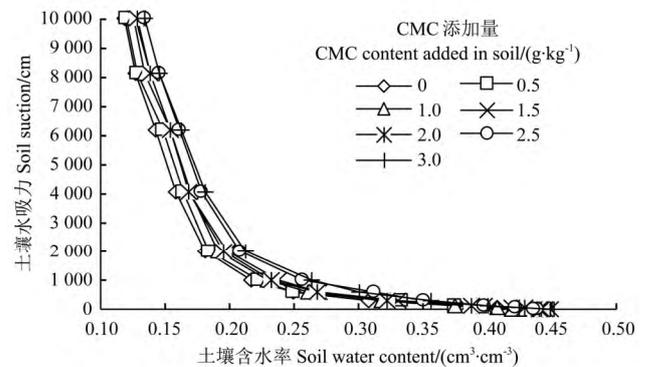


图 5 CMC 对土壤水分特征曲线的影响
Fig.5 Influence of CMC on soil water characteristic curve

表 3 van Genuchten 公式参数拟合
Table 3 van Genuchten formula fitting parameters

CMC 添加量 CMC content added in soil/(g·kg ⁻¹)	参数 Parameters				
	滞留含水率 Residual water content θ_r / (cm ³ ·cm ⁻³)	饱和含水率 Saturated water content θ_s / (cm ³ ·cm ⁻³)	与进气值相关的系数 Coefficient associated with intake value α	形状系数 Shape coefficient n	决定系数 Determination coefficient <i>R</i> ²
0	0.12	0.42	0.0031	1.75	0.99
0.5	0.12	0.43	0.0036	1.73	0.97
1.0	0.12	0.43	0.0049	1.42	0.98
1.5	0.13	0.44	0.0053	1.43	0.99
2.0	0.13	0.45	0.0051	1.43	0.98
2.5	0.13	0.44	0.0052	1.41	0.96
3.0	0.14	0.46	0.0054	1.40	0.99

3 结论与讨论

1) 随着 CMC 含量的增大，0.25 mm 以上的水稳性团聚体含量增加；土壤中黏粒和粉粒比例减少，砂粒比例增多；黏粒、粉粒均与分形维数呈正相关关系，而砂粒与分形维数呈负相关关系，黏粒含量对土壤分形维数影响最为显著；<0.1 mm 的土壤颗粒含量减少，而 ≥0.1 mm 的土壤颗粒含量均有不同程度的增加。

2) CMC 可以显著减小土壤入渗能力，随 CMC 含量的增大，累积入渗量、入渗率和稳定入渗率均显著减小；

分别用 Philip 公式、Kostiakov 公式拟合试验数据，Philip 公式中的吸渗率随 CMC 含量的增大而显著减小；Kostiakov 公式中的系数 K 随 CMC 含量的增大而减小，而指数 β 呈增大趋势。

3) CMC 增加了土壤对水分的保持能力；用 van Genuchten 公式拟合土壤水分特征曲线，随着 CMC 含量的增大，滞留含水率 θ_r 、饱和含水率 θ_s 、与进气值相关的系数 α 逐渐增大，形状系数 n 逐渐减小。

本试验仅考虑了 CMC 对土壤团粒结构及水分运动的影响，没有从 CMC 对土壤养分迁移方面的影响做出相

应的研究;另外根据本试验结论,CMC 可以增加土壤水稳性团聚体含量,对土壤的抗侵蚀性有一定影响,因此在后续研究中可以对 CMC 的抗侵蚀能力作进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 牛生洋,郝峰鸽.羧甲基纤维素钠的应用进展[J].安徽农业科学,2006,34(15):3574-3575.
Niu Shengyang, Hao Fenge. Applcation of carboxyl methyl cellulose[J]. Anhui Agriculture Science, 2006, 34(15): 3574-3575. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨之礼,苏茂尧,高洸.纤维素醚基础与应用[M].广州:华南理工大学出版社,1990.
- [3] Tang Juntao, Fan Chuanjie, Lin Qunfang, et al. Smooth, stable and optically transparent microcapsules prepared by one-step method using sodium carboxymethyl cellulose as protective colloid[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014(459): 65-73.
- [4] Maryia Shakun T H, Wolfgang Radke. Determination of the DS distribution of non-degraded sodium carboxymethyl cellulose by gradient chromatography[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(1): 943-950.
- [5] 韩博,张凌,蒋国盛,等.不同剪切作用下 CMC 水溶液的微观结构研究[J].地质科技情报,2012,31(1):122-126.
Han Bo, Zhang Ling, Jiang Guosheng, et al. Microstructure research of CMC Solution at the different sheating action[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(1): 122-126. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张丽平,余小琴.羧甲基纤维素钠(CMC)在食品工业的应用情况和研究动态[J].中国食品添加剂,2006(1):118-125.
Zhang Liping, Yu Xiaoqin. Application of CMC in food industry and its decelopment[J]. China Food Additives, 2006(1):118-125. (in Chinese with English abstract)
- [7] 朱刚卉.钻井液用低粘度羧甲基纤维素钠的研制[J].精细石油化工,2005(6):23-25.
Zhu Ganhui. Research and development of low-viscosity sodium carboxymethyl cellulose for drilling[J]. Speciality Petrochemicals, 2005(6): 23-24. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈崇,陈祥迎,谢东华.基于羧甲基纤维素钠制备氮掺杂多孔炭及其电容性能研究[J].物理化学学报,2013,29(1):102-110.
Chen Chong, Chen Xiangying, Xie Donghua. Synthesis of nitrogen doped porous carbons from sodium carboxy methyl and the capacitive performance[J]. Acta Physico Chimica, 2013, 29(1): 102-110. (in Chinese with English abstract)
- [9] 董思民.CMC 市场开发与应用研究[J].纤维素醚工业,2000,8(3):31-36.
Dong Simin. Market development and application research of CMC[J]. Cellulose Ether Industry, 2000, 8(3): 31-36. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张凤清,张海悦,李力.变性淀粉在番茄沙司中的应用[J].食品工业,2004(5):25-26.
Zhang Fengqing, Zhang Haiyue, Li Li. The application of the modified starch in tomato sauce[J]. Food Industry, 2004(5): 25-26. (in Chinese with English abstract)
- [11] 聂华容,柳明珠.羧甲基纤维素钠水凝胶的制备及其生物降解性研究[J].功能高分子学报,2003,16(4):553-556.
Nie Huarong, Liu Mingzhu. Preparation and biodegradation properties of hydrogel from sodium carboxymethyl cellulose[J]. Journal of Functional Polymers, 2003, 16(4): 553-556. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张磊,张根林,鲁建江,等.羧甲基纤维素钠-改性膨润土复合凝胶的制备及缓释性能[J].西北农业学报,2012,21(1):161-164.
Zhang Lei, Zhang Genlin, Lu Jianjiang, et al. Preparation of carboxyl methyl cellulose, modified bentonite blend gel beads and their performance on slow release of fertilizer[J]. Acta Agriculture Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(1): 161-164. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张雷波,焦娇,赵雪艳,等.生态友好型抑尘剂的使用及制备及性能[J].农业工程学报,2013,29(18):218-225.
Zhang LeiBo, Qiao jiao, Zhao Xueyan, et al. Study of perparation and properties of eco-friendly dust suppresant[J]. Transactions of the Chinese Socity of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 218-225. (in Chinese with English abstract)
- [14] 邱朝霞,张若冰,丘海霞,等.含蒙脱土和多糖的保水剂对土壤物理性质的影响[J].中国土壤肥料,2013(6):11-16.
Qiu Zhaoxia, Zhang Ruobing, Qiu Haixia, et al. Effects of suoerabsorbents containing montmorillonite and polysaccharide on soil physical properties[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013(6): 11-16. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杨雪芹,王旭东.结构改良剂对娄土团聚体分布的影响[J].江苏农业科学.2004(1):412-413.
Yang Xueqin, Wang Xudong. Effects of soil amendment on distrubution of aggregate in Lontu soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2004(1): 412-413. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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(11):69-70.
Zeng Xiaoduo, Ling Yuqing, Lin Lanying, et al. Effect of Sodium carboxymethyl cellulose in acidic soil improvement and the growth of rice[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2009(11):69-70. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张双兰,邱朝霞,丘海霞.含蒙脱土和多糖的保水剂对高羊茅品种可奇思种子萌发及生长的影响[J].草原与草坪,2013,33(6):41-46.
Zhang Shuanglan, Qiu Zhaoxia, Qiu Haixia. Effects of super absorbent with polysacchaide and montmorillonite on the germination and growth of tall fescue Cochies[J]. Grassland and Lawn, 2013, 33(6): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [18] 雷国梁,张虎才,张文祥. Mastersize2000 型激光粒度分析仪数据可靠性检验及意义[J].沉积学报,2006,24(4):531-538.
Lei Guoliang, Zhang Hucai, Zhang Wenxiang, et al. The reliability and significance of the grain-size obtaned by mastersize 2000 laser analyzer[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 531-538. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李小鹏,刘建立,张佳宝,等.华北平原壤质潮土的土壤粒径分形空间尺度分析[J].农业工程学报,2014,30(4):118-123.

- Li Xiaopeng, Liu Jianli, Zhang Jiabao, et al. Analysis of fractal magnitude of soil particels in loamy Chao soil in North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 118—123. (in Chinese with English abstract)
- [20] 伏耀龙, 张兴昌, 王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 120—125. Fu Yaolong, Zhang Xingchang, Wang Jingui. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristic in dry valley of upper Minjiang river[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 120—125. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545—550. Wang Guoliang, Zhou Shenlu, Zhao Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(4): 545—550. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896—1899. Yang Peilin, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Soil fractal characteristics measured by mass of particle-size distribution[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896—1899. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40—45. Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 40—45. (in Chinese with English abstract)
- [24] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340—347. Qi Yingchun, Wang Yiquan, Liu Jun, et al. Comparative on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 340—347. (in Chinese with English abstract)

Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement

Wu Junhu^{1,2}, Tao Wanghai², Wang Haiyang², Wang Quanjiu²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaan xi 712100, China;

2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Soil amendment agent plays important role in improving soil structure and enhancing crop growth. Sodium carboxyl methyl cellulose (CMC) is anion linear polymer cellulose ether, which is odorless, tasteless and nontoxic. It is regarded as an effective soil amendment agent because of its strong water absorption capacity. In this paper, a laboratory study was carried out to investigate the influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement in the soil columns by respectively adding 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 g CMC into each 1 000 g soil collected from Changwu agro-ecological experiment station in the loess plateau. The results indicated that water stable aggregate content increased from 3.36% to 15.05%, and the soil fractal dimension reduced from 2.53 to 2.37 with increasing CMC content. In the meantime, clay content reduced from 3.47% to 0.84%, silt content reduced from 86.19% to 61.27%, but sand content increased from 10.35% to 37.89%. Clay and silt contents were negatively correlated with soil fractal dimension, and sand content was positively correlated with soil fractal dimension. The influence of clay content was most significant on soil fractal dimension. The content of soil particle less than 0.1 mm reduced from 85.59% to 48.41%, but the content of soil particle between 0.1 and 0.2 mm, 0.2 and 0.3 mm, 0.3 and 0.4 mm, 0.4 and 0.5 mm, 0.5 and 0.6 mm increased from 9.53% to 22.56, 2.14% to 10.99%, 1.31% to 6.69%, 0.84% to 4.31%, 0.43% to 2.81% respectively, and the content of soil particle larger than 0.6 mm increased slightly. The relationship between water stable aggregate content, soil fractal dimension, clay content, silt content, sand content and CMC content followed quadratic function ($R^2 \geq 0.95$, $P \leq 2.92 \times 10^{-3}$). The relationship between clay content, silt content, sand content and soil fractal dimension followed linear function ($R^2 \geq 0.95$, $P \leq 1.85 \times 10^{-6}$). The soil infiltration capacity and the stable infiltration rate reduced with increasing CMC content. The cumulative infiltration volume reduced from 14.36 cm to 3.28 cm after 700 minutes. The stable infiltration rate reduced from 0.0150 to 0.0028 cm/min, and the relationship between stable infiltration rate and CMC content followed linear function ($R^2 = 0.96$, $P = 2.99 \times 10^{-6}$). Infiltration rate in Philip formula reduced from 0.46 to 0.13, the empirical coefficient K in Kostiaikov formula reduced from 0.29 to 0.16, but the exponent increased from 0.41 to 0.53. Soil water retention capacity was enhanced with the increasing CMC content. The residual water content, saturated water content and coefficient associated with intake value in van Genuchten formula were increased, but the shape coefficient decreased with increasing CMC content. The residual water content increased from 0.12 to 0.14, saturated water content increased from 0.42 to 0.46, coefficient associated with intake value increased from 0.0031 to 0.0054 and shape coefficient reduced from 1.75 to 1.40. The results suggested that CMC can hinder water movement by reacting with water to form gel and then the smaller soil particles can be combined into the bigger soil aggregates. In conclusion, CMC additions agent could change soil structure and decrease soil infiltration capacity effectively. This study may provide valuable information for the application of CMC in soil improvement.

Key words: moisture; soil conditioners; sodium carboxyl methyl cellulose; aggregate structure; fractal dimension