

## 羧甲基纤维素钠对黄土高原新造耕地土壤改良效果

杨世琦<sup>1,2</sup> 邢磊<sup>1,2</sup> 刘宏元<sup>1,2</sup> 郭萍<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081;  
2. 农业农村部农业环境与气候变化重点开放实验室,北京 100081)

**摘要** 基于陕西省延安市新造耕地土壤水分与养分的改良需求,以羧甲基纤维素钠(CMC-Na)为土壤改良剂,设置田间定位试验 CK(CMC-Na 0 kg/hm<sup>2</sup>)、T1(CMC-Na 100 kg/hm<sup>2</sup>)、T2(CMC-Na 500 kg/hm<sup>2</sup>)、T3(CMC-Na 1 000 kg/hm<sup>2</sup>)和 T4(CMC-Na 2 000 kg/hm<sup>2</sup>)5 个处理,探究不同处理对新造耕地土壤水分、电导率与养分的影响。结果表明:1)在对照土壤含水量<16.3%的情况下,提高土壤含水量 21.3%~120.9%;然而,在对照土壤含水量>16.3%的情况下,与处理的土壤含水量无显著差异。2)新造耕地土壤电导率随生长季出现逐渐降低趋势,不同 CMC-Na 施用量之间存在差异。3)施用 CMC-Na 主要影响土壤速效养分,对土壤全氮、全磷和全钾影响则较小。较低 CMC-Na 施用量的 T1 和 T2 处理可提高土壤硝态氮,较高 CMC-Na 施用量的 T3 和 T4 处理降低土壤硝态氮,提高土壤速效磷和速效钾含量,对新造耕地的土壤 pH 基本没有影响。4)较低 CMC-Na 施用量 T1 和 T2 处理的谷子产量分别提高 6.4%和 5.7%,较高 CMC-Na 施用量 T3 降低产量。因此,CMC-Na 可提高土壤水分,并促进养分吸收利用,从而提高作物产量,可作为黄土高原新造耕地土壤改良剂,推荐施用量约 100 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词** 黄土高原; 新造耕地; 土壤改良; 羧甲基纤维素钠

中图分类号 S03 文章编号 1007-4333(2021)04-0185-07 文献标志码 A

## Effects of sodium carboxymethyl cellulose application on soil properties of new cultivating farmland in Loess Plateau

YANG Shiqi<sup>1,2</sup>, XING Lei<sup>1,2</sup>, LIU Hongyuan<sup>1,2</sup>, GUO Ping<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;  
2. Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

**Abstract** Based on the requirement of soil water and nutrient improvement of new cultivating farmland of Loess Plateau in Yan'an, Shaanxi Province, sodium carboxymethyl cellulose (CMC-Na) was selected as soil amendment. Field experiments were conducted. Five treatments, CK (0 kg/hm<sup>2</sup>), T1 (CMC-Na 100 kg/hm<sup>2</sup>), T2 (CMC-Na 500 kg/hm<sup>2</sup>), T3 (CMC-Na 1 000 kg/hm<sup>2</sup>) and T4 (CMC-Na 2 000 kg/hm<sup>2</sup>), were designed to investigate their effects on soil water content, soil electric conductivity and soil nutrient. The results were shown as follows: 1) Applying CMC-Na had a great effect on soil water content and increased soil water content to 21.3% - 120.9% when soil water content was less than 16.3%. While there were no significant differences among treatments when soil water content was more than 16.3%. 2) The soil electric conductivity gradually decreased with millet growing season in new cultivating farmland, but the decreasing trends were different among treatments. The main influence factor of soil electric conductivity was soil nutrient. 3) Applying CMC-Na mainly affected soil available nutrient more than the total nitrogen, total phosphorus and total potassium, and raised available phosphorus and potassium. The lower amount of CMC-Na application in T1 and T2 improved nitrate in soil and the higher amount of CMC-Na application of T3 and T4 reduced nitrate in soil. The

收稿日期: 2020-08-08

基金项目: “十三五”重点研发项目(2017YFD0800504)

第一作者: 杨世琦,研究员,主要从事农田面源污染控制研究,E-mail:shiqiyang@126.com

通讯作者: 郭萍,研究员,主要从事农业面源与水污染控制研究,E-mail: guoping@caas.cn

CMC-Na application no effect on soil pH. 4) The millet yield were respectively increased by 6.4% and 7.5% in T1 and T2 and it was reduced yield in T3. In conclusion, the CMC-Na application increased soil water content, promoted plant nutrient absorption and raised millet yield. It can be used as soil amendment for new cultivating farmland in Loess Plateau and the recommended application rate is 100 kg/hm<sup>2</sup>.

**Keywords** Loess Plateau; new cultivating farmland; soil improvement; sodium carboxymethyl cellulose

治沟造地是我国陕西省延安市针对黄土高原丘陵沟壑区特殊地貌,集坝系建设、旧坝修复、盐碱地改造、荒沟闲置土地开发利用和生态建设为一体的一种沟道治理新模式。其目的通过闸沟造地、打坝修渠、垫沟覆土等主要措施,实现小流域坝系工程提前利用,是增良田、保生态、惠民生的系统工程。延安市自2013年开展治沟造地,2016年完成治沟造地约2.67万hm<sup>2</sup>,2018年达到3.33万hm<sup>2</sup>。然而,由于土壤贫瘠、土质疏松、水肥保持能力差,易发生水土流失和养分淋溶等是新造耕地普遍存在的问题,导致作物减产和造成农民减收。施用土壤改良剂是改善新造耕地土壤质量的重要选择。人工合成土壤改良剂始于20世纪50年代,主要用于改善土壤结构,促进团粒结构形成,提高土壤保水持水能力,增加有效水供应,调理失衡的土壤养分体系和促进有效养分供应<sup>[1-2]</sup>。聚丙烯酰胺(PAM)作为一种土壤改良剂,能增加土壤SOM、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>的含量,提高养分吸附量,减少淋溶损失,在一定施用量范围内,用量越大,效果越好<sup>[3]</sup>。施用PAM或PAM的复合物在土壤团聚体、毛管孔隙度、土壤容重、水土流失治理、土壤入渗、土壤侵蚀控制、固土、固沙的水利及公路建设中方面取得了预期效果<sup>[4-9]</sup>,但PAM降解中间产物丙烯酰胺有毒,存在环境污染风险,不适宜用于耕地土壤改良。国外文献中的土壤改良剂涉及材料很泛,如高分子材料、腐殖质、污泥、生物炭、真菌、木屑、粘土矿物、石膏、磷酸盐化合物、粉煤灰和膨润土等,土壤改良也不仅限于水分保持和养分提高,还包括了土壤重金属修复、微生物和土壤动物、盐碱改良等<sup>[10-13]</sup>。

基于国内外土壤改良剂及相关材料研究进展,最终确定羧甲基纤维素(Carboxymethyl cellulose, CMC)为黄土高原新造耕地最佳土壤改良剂。羧甲基纤维素是由天然纤维素经过化学改性得到的一种水溶性纤维素醚,具有吸湿性强,易溶于水和光、热稳定性好等优点。CMC在新材料开发方面的潜力很大,以其为基础的化工材料或产品很多,用途十分广泛,然而已有研究主要涉及化工、医学和食品等学

科领域,环境学科领域很少,农业学科领域更少。CMC改性后的很多材料在污泥沉降、水体阳离子去除和重金属吸附等方面表现出优良性能<sup>[14-17]</sup>。CMC-Na有一定的固沙功能<sup>[18]</sup>,CMC经过PAM改性,能够在沙土表面形成具有致密网状结构的固化层,稳定性与抗蚀性明显提高<sup>[19-21]</sup>。CMC经过纳米零价铁(CMC-nFe<sup>0</sup>)改性与厌氧微生物耦合具有良好的Cr<sup>5+</sup>稳定性与固定化作用,在土壤污染修复方面具有很大的潜力<sup>[22]</sup>。羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)是羧甲基纤维素的重要改性产品,可作增粘剂、医药乳化剂、食品增稠剂、陶瓷胶粘剂、工业糊料和造纸施胶剂等。利用CMC-Na的粘性功能进行土壤水分与养分吸附,实现水分养分保持,能够改善新造耕地的土壤质量。目前尚未见以CMC-Na作为土壤改良剂的报道,因此,本研究鉴于CMC-Na材料的特性及其应用基础,首次试验采用CMC-Na作为新型土壤改良剂,针对延安新造耕地土壤改良的需求,开展羧甲基纤维素钠(CMC-Na)施用下的土壤水分与养分的效应研究,揭示其土壤改良效果,以期为CMC-Na的土壤改良提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于陕西省延安市安塞区南沟村(36°52'28" N, 109°13'36" E),属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,中温带大陆性半干旱季风气候,四季分明,全年无霜期160 d,平均气温9.1℃,降水量约506 mm,主要集中在7—9月,年日照时数为2396 h,日照54%,平均海拔1219 m。试验地为3年新造耕地(第三年撂荒),位于梁峁顶部,为自上而下的第二级梯田,田面为半圆状,一面靠坡,三面临崖,光照充足。农田土壤属黄绵土类型,质地为轻壤土。2018年试验前土壤耕层(0~20 cm)基本理化性状为:全氮0.38 g/kg,全磷0.37 g/kg,全钾4.9 g/kg,硝态氮2.9 mg/kg,有效磷10.10 mg/kg,速效钾38.1 mg/kg, pH 8.5,土壤有机质8.5 g/kg,土壤容

重  $1.35 \text{ g/cm}^3$ 。

## 1.2 试验设计及方法

试验设计 CK ( $0 \text{ kg/hm}^2$ )、T1 ( $100 \text{ kg/hm}^2$ )、T2 ( $500 \text{ kg/hm}^2$ )、T3 ( $1\ 000 \text{ kg/hm}^2$ ) 和 T4 ( $2\ 000 \text{ kg/hm}^2$ ) 等 5 个处理, 每个处理重复 3 次。每个小区面积  $24 \text{ m}^2$  ( $4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ), 小区间以土埂间隔, 重复 3 次。2018 年 5 月 10 日整地播种, 一次性施入复合肥 ( $m_{\text{N}} : m_{\text{P}_2\text{O}_5} : m_{\text{K}_2\text{O}} = 15 : 14 : 16$ )  $2\ 400 \text{ kg/hm}^2$  与羊粪约  $3\ 000 \text{ kg/hm}^2$  做基肥。谷子品种: 晋谷 40, 行距  $30 \text{ cm}$ , 播量  $7.5 \text{ kg/hm}^2$ 。出苗后按  $10 \text{ cm}$  株距定苗。在苗高达  $10 \text{ cm}$  左右时, 行间开沟  $5 \text{ cm}$  深, 均匀撒施不同处理的 CMC-Na 后覆平。10 月 9 日收获, 生长期约  $150 \text{ d}$ 。田间采用 TDR350 测定土壤水分和电导率 ( $20 \text{ cm}$  土层), 每个处理测定 3 次。土壤取样深度  $20 \text{ cm}$ , 采用三点法, 混匀后装取样袋。实验室采用 AA3 流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量,  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提-火焰光度法测定速效钾含量, 半微量开氏法测定全氮含量,  $\text{NaOH}$  熔融-钼锑抗比色法测定全磷含量,  $\text{NaOH}$  熔融-火焰光度法测定全钾含量, 梅特勒-托利多 pH 计将水土比按照  $5 : 1$  体积比充分震荡静置后测 pH。谷子收获前, 每个小区随机选取 10 株带回室内进行测定。测定采用 Microsoft Excel 2013 与 Origin 9.0 进行数据整理分析, 选用 ANOVA 进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用 CMC-Na 对谷子田间土壤水分的影响

在谷子生长季, 共分 5 次检测各处理的土壤含水量, 间隔期大约 1 个月, 不同 CMC-Na 施用量对新造耕地的土壤含水量的影响结果见图 1。6 月 28 日: T1 和 T2 的土壤含水量与对照相比达到显著差异 ( $P < 0.05$ , 下同), 比对照分别增加  $36.9\%$  和  $34.1\%$ , T1 和 T2 之间无显著差异; T3 和 T4 的土壤含水量与对照相比, 差异不显著。7 月 29 日: 除 T2 外的其它处理的土壤含水量与对照相比, 均达到显著差异, T1、T3 和 T4 比对照组分别增加  $100.0\%$ 、 $60.9\%$  和  $66.7\%$ 。8 月 30 日: T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤含水量与对照差异均不显著。9 月 23 日: 除 T1 外的其它处理土壤含水量与对照达到显著差异; T2、T3 和 T4 比对照分别增加  $28.0\%$ 、 $37.6\%$  和  $21.3\%$ 。10 月 7 日: T1、T2、T3 和 T4 处理与对照相比, 均达到显著差异, 分别增加  $71.8\%$ 、 $107.3\%$ 、 $75.2\%$  和  $120.9\%$ 。由此可见, 施用 CMC-Na 改良剂后, 提高了土壤水分含量。在对照土壤含水量较低的情况下 ( $< 16.3\%$ ), 4 个处理组土壤含水量与对照相比差异更明显; 在对照土壤含水量较高的情况下 ( $> 16.3\%$ ), 与处理的土壤含水量差异性降低, 甚至无差异。结果表明, 施用 CMC-Na 的保水性受土壤自身水分的影响较大: 新造耕地土壤

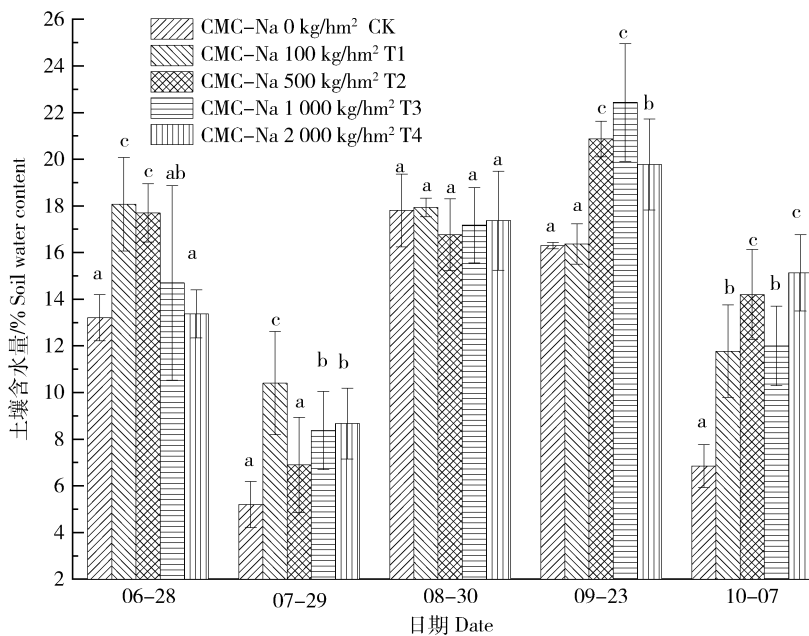


图 1 不同 CMC-Na 施用量对土壤含水量的影响

Fig. 1 Effects of different CMC-Na application amount on soil water content

含水量达 16.3%，是 CMC-Na 能否发挥保水功能的基本条件。在 CMC-Na 施用量为  $100 \text{ kg/hm}^2$  的情况下，能产生土壤保水效果；在谷子生长季前期尤为明显。另外，CMC-Na 施用量与生长季降水量因素也有相关性。根据当地 2018 年降水量资料，全年降水量 511.8 mm，6—10 月为 420.7 mm，占全年降水量的 82.2%。其中：6 月份降水量 78.3 mm；7 月份降水量 194.1 mm（7 月 1—21 日降水量 190.2 mm）；8 月份 58.4 mm；9 月份降水量 74.0 mm；10 月上旬降水量 0.0 mm。因此，试验期间测得的谷子土壤含水量在 6、8 和 9 月相对较高，10 月相对较低；降水量在 7 月虽然很大，但土壤含水量却是最低，可能原因是谷苗较小，田间未能封行，农田蒸发导致土壤水分损失较大所致。

## 2.2 施用 CMC-Na 对谷子田间土壤电导率的影响

在谷子生长季，共分 5 次检测各处理的土壤电导率，间隔期大约 1 个月，不同 CMC-Na 施用量对新造耕地的土壤电导率影响结果见图 2。6 月 28 日：T1 和 T3 的土壤电导率与对照相比达到显著差异，且 T1 与 T3 相比达到显著差异，分别比对照增加 22.8% 和 8.9%；T2 和 T4 与对照差异不显著，

且 T2 与 T4 之间差异不显著。7 月 29 日：T1 和 T3 的土壤电导率与对照相比达到显著差异，且 T1 与 T3 之间达到显著差异，分别比对照降低了 30.9% 和 20.6%；T2 和 T4 处理与对照差异不显著。8 月 30 日：T2 和 T4 的土壤电导率与对照相比达到显著差异，且 T2 与 T4 之间达到显著差异，分别比对照增加了 17.4% 和 34.8%；T1 和 T3 与对照相比差异不显著。9 月 23 日：除 T4 外的其它处理土壤电导率与对照相比差异不显著，T4 比对照增加 18.3%。10 月 7 日：T2 和 T3 的土壤电导率与对照相比达到显著差异，分别比对照降低 23.1% 和 26.9%；T1 和 T4 与对照差异不显著。由于土壤电导率受土壤水分和土壤盐分等综合因素影响，导致土壤电导率变化相对复杂。6、8 和 9 月是土壤含水量相对较高的时期，尤其是 9 月的土壤电导率却相对较低；7 月的测定的土壤含水量相对较低，但土壤电导率却没有明显偏低。因此，除了水分因素外，土壤盐分对土壤电导率的影响很大。由于新造耕地的土壤盐分相对较低，土壤养分主要受化肥投入和谷子生长季的影响，前期肥力相对充裕，土壤电导率较高；后期由于作物吸收利用导致肥力下降，土壤电导率就较低。

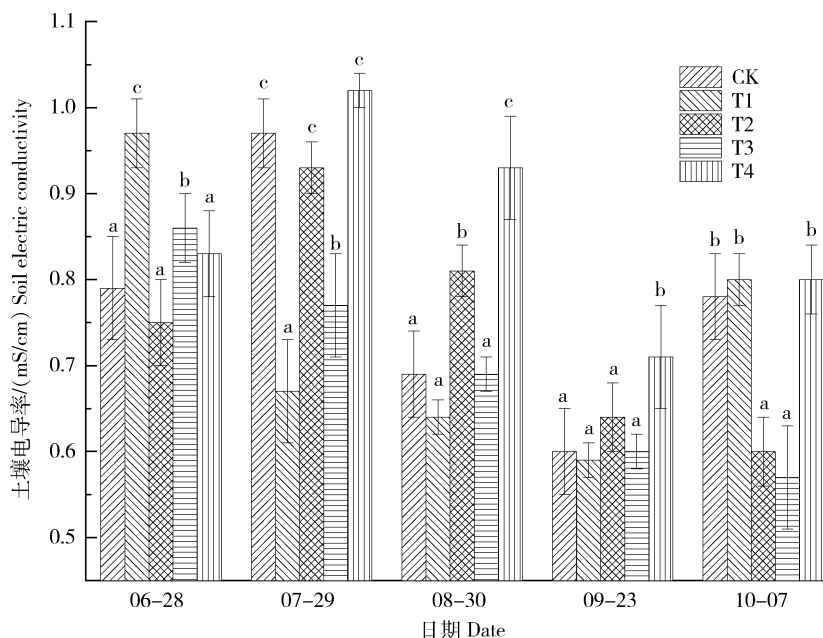


图 2 施用 CMC-Na 对土壤电导率的影响

Fig. 2 Effect of different CMC-Na application amount on soil electric conductivity

## 2.3 施用 CMC-Na 对谷子田间土壤养分的影响

在谷子生长季结束，检测各处理的土壤电导率，不同 CMC-Na 施用量对新造耕地的土壤养分影响

结果见表 1。从土壤养分的测定结果可以看出，全部处理的土壤全氮和全磷与对照相比没有显著差异；土壤全钾除 T1 外的其他处理与对照未达到显



著差异, T1 比对照增加了 12.9%; 全部处理的土壤硝态氮与对照达到显著差异, T1 和 T2 比对照分别增加了 38.7% 和 46.4%, T3 和 T4 比对照分别降低了 11.8% 和 29.5%; 全部处理的土壤速效磷与对照达到显著差异, T1、T2、T3 和 T4 分别比对照增加了 207.9%、50.0%、63.2% 和 792.1%; 土壤速效

钾除 T3 外的其它处理与对照达到显著差异, T1、T2 和 T4 分别比对照增加了 25.7%、13.2% 和 19.9%。这一试验结果表明, CMC-Na 对土壤速效养分影响较大, 土壤硝态氮有增有降, 提高土壤速效磷和速效钾含量。另外, 施用 CMC-Na 对新造耕地的土壤 pH 基本没有影响。

表 1 不同 MC-Na 施用量对土壤养分的影响

Table 1 Effects of different CMC-Na application amount on soil nutrient

处理 Treat- ment	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium	硝态氮/ (mg/kg) Nitrate nitrogen	速效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	速效钾/ (mg/kg) Available potassium	pH
CK	0.57±0.02 a	0.48±0.02 a	5.78±0.20 a	4.68±0.44 c	0.38±0.04 a	45.33±2.52 a	8.38±0.01 a
T1	0.57±0.00 a	0.45±0.00 a	6.53±0.28 b	6.49±0.27 d	1.17±0.13 c	57.00±5.00 b	8.39±0.04 a
T2	0.66±0.05 b	0.48±0.05 a	6.07±0.65 a	6.85±0.19 d	0.57±0.12 b	51.33±3.51 b	8.25±0.12 a
T3	0.59±0.03 a	0.43±0.03 a	6.07±0.46 a	4.13±0.35 b	0.62±0.36 b	46.00±3.61 a	8.38±0.26 a
T4	0.55±0.09 a	0.47±0.09 a	5.43±0.48 a	3.30±0.19 a	3.39±0.24 d	54.33±3.21 b	8.34±0.04 a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different small letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level.

### 2.4 施用 CMC-Na 对谷子产量的影响

在谷子生长季结束, 检测各处理的谷子产量, 不同 CMC-Na 施用量对新造耕地的谷子产量影响结果见图 3。试验结果表明, T1、T2 和 T3 处理的产量与对照相比达到显著差异, 其中, T1 和 T2 比对照增产 6.4% 和 5.7%, T3 比对照减产 8.3%。可以推测, CMC-Na 较低施用量能够提高新造耕地谷子产量, 较大施用量则可能不利于谷子生长, 对产量有一定负效应。

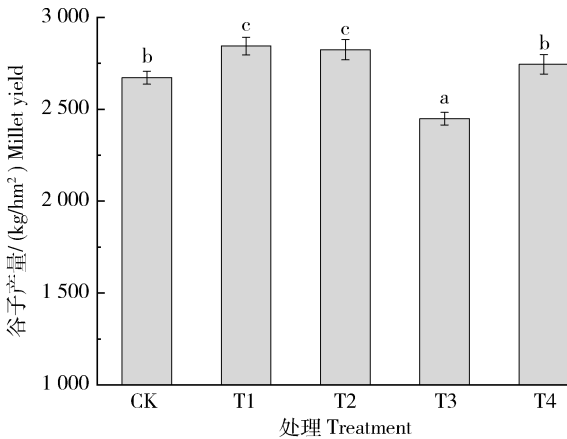


图 3 施用 CMC-Na 对谷子产量的影响

Fig. 3 Effect of different CMC-Na application amount on millet yield

### 3 讨论

新造耕地施用 CMC-Na 能够提高土壤含水量, 具有土壤保水效果。从本试验结果看, 随 CMC-Na 施用量的增加, 土壤含水量并未出现增加或成倍增加的趋势, 也未出现随谷子生长季延续土壤含水量增加的趋势, 分析原因如下: 一是 CMC-Na 的吸水倍率是自身的几十倍、几百倍, 相对于强大的吸水潜力, 土壤本身所含水分远远不足, 因此, 当 CMC-Na 施用量增加, 不会使土壤含水量出现同比例的增长, 因此在土壤水分相对匮乏的情况下, 各处理之间无显著差异。在较小施用量情况下, 材料与水分在土壤中表现为溶胶状态, 在较大施用量情况下, 材料与水分在土壤则表现为固态, 造成施用量较小的处理土壤含水量高于施用量较大的处理的效果。二是 CMC-Na 的水分吸附与释放过程同时发生, 吸水过程较快, 释放水分过程相对较慢, 因而土壤含水量并没有随生长季变化。本研究选择 CMC-Na 作为土壤改良剂的田间试验尚属首次, 关于 CMC-Na 在土壤中的水分吸附机理与吸附过程有待进一步研究。

土壤电导率的大小是土壤浸出液中阳离子的量和阴离子的量之和, 与土壤溶液可溶性离子的总量成正相关。农田土壤电导率测定受土壤水分、土壤

养分(离子)、土壤温度、pH 以及农作物吸收利用等因素影响,作为土壤养分状况评价的参考。从试验结果看,土壤电导率与土壤水分不存在必然的正相关,或负相关。总体上在谷子生长季结束,检测各处理的土壤电导率,以不同 CMC-Na 施用量对新造耕地的土壤养分的影响结果。可以看出,土壤电导率随生长季出现逐渐降低趋势,这个结果可能是由于谷子生长过程中对土壤养分的吸收利用,土壤养分离子浓度降低导致土壤电导率下降;不同 MC-Na 的施用量处理之间有一定差异,但其施用量大小与土壤电导率无相关。在土壤含水量较低情况下(如 7 月下旬),土壤电导率也并不低,在土壤含水量较高的情况下(如 6 月下旬、8 月下旬与 9 月下旬),土壤电导率较前一阶段均有降低,推断这个时段的土壤电导率主要影响因素可能是土壤养分。在谷子收获期,较低 CMC-Na 施用量处理的土壤电导率低于对照,推测是土壤养分离子吸收利用率相对较高所致。新造耕地土壤电导率的主要影响因素可能是土壤养分,在土壤养分较高时,土壤电导率较高;土壤养分较低时,土壤电导率较低。

施用 CMC-Na 在吸附土壤水分同时,也能够对土壤溶液中的养分离子产生一定的吸附作用,这一点在土壤电导率检测试验结果中得到一定反映。从试验开始与结束的 2 次土壤样品的养分检测结果比较来看,4 个 CMC-Na 处理与对照的土壤全氮与全磷的开始与结束基本没有变化,而土壤全钾有显著降低,土壤硝态氮、土壤速效钾和土壤速效钾有显著降低,不同处理的降低幅度比较也有差异,表明土壤养分得到不同程度的吸收利用,最终体现在谷子产量上。由此可见,CMC-Na 具有作为新造耕地土壤改良剂的潜质。事实上,羧甲基纤维素及其衍生材料都具有较强的离子吸附功能,这方面的研究较多:如 CMC/PEI(聚乙烯亚胺)水凝胶能够提高  $\text{Cr}^{5+}$  去除率<sup>[23]</sup>;硫酸羧甲基纤维素纳米滤膜(SCMC-GA-NF)的最大  $\text{Cr}^{5+}$  去除效率达到了 79.9%<sup>[24]</sup>;CMC 固定化  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒(CMC- $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )对 Pb(II)最大吸附能力达到 152.0 mg/g<sup>[15]</sup>;CMC 对农业废水中磷的去除率达到 71%<sup>[25]</sup>;CMC 和丙烯酰胺(AM)的接枝共聚物浊度去除率超过 99%<sup>[16]</sup>。本研究团队前期研究也证实了 CMC-Na 能够吸附水体环境的  $\text{PO}_4^{3-}$ ,在盆栽试验条件下,施用 CMC-Na 能够显著提高土壤碱解氮含量 18.2%<sup>[26]</sup>。

## 4 结 论

本研究表明,CMC-Na 材料可以作为黄土高原新造耕地的土壤改良剂,能够提高土壤水分,改善土壤养分状况,促进土壤养分吸收利用,对谷子增产有一定贡献。从试验结果看,CMC-Na 在较大施用量情况下,土壤改良效果并没有显著提高,而且导致种植成本过度增加。本研究推荐 CMC-Na 施用量 100 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参考文献 References

- [1] Xie T, Sadasivam B Y, Reddy K R, Wang C G, Kurt S. Review of the effects of biochar amendment on soil properties and carbon sequestration[J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2016, 20(1): 04015013
- [2] Hua Y M, Heal, K V, Wolfgang F. The use of red mud as an immobiliser for metal/metalloid-contaminated soil: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 5(325): 17-30
- [3] Li F H, Wang A P. Interaction effects of polyacrylamide application and slope gradient on potassium and nitrogen losses under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2016(136): 162-174
- [4] Chang A, Yang P L, Zeng W Z, Chen W L, Xu Y, Zha Y Y, Wu J W, Huang J S. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing[J]. *Geoderma*, 2019(353): 372-381
- [5] Zheng M, Huang Z, Ji H D, Qiu F G, Zhao D Y, Alexandria R C, Byron H F. Simultaneous control of soil erosion and arsenic leaching at disturbed land using polyacrylamide modified magnetite nanoparticles [J]. *Science of The Total Environment*, 2020(702): 134997
- [6] Elham A, Hojat E, Mohammad R, Ali R A. Shear strength of an unsaturated loam soil as affected by vetiver and polyacrylamide[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019(194): 104331
- [7] Tadayonnejad M, Mosaddeghi M, Ghorbani S H. Changing soil hydraulic properties and water repellency in a pomegranate orchard irrigated with saline water by applying polyacrylamide [J]. *Agricultural Water Management*, 2017(188): 12-20
- [8] Chen Z, Wang R X, Han P Y, Sun H L, H F, Li C J, Yang L X. Soil water repellency of the artificial soil and natural soil in rocky slopes as affected by the drought stress and polyacrylamide[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 619-620: 401-409
- [9] Christophe N, Liang X Q, Shan S D, Jin Z, Benjamin M T, Hosseini S, Sangar K, Li F Y, Tian G M. Synergistic effects of anionic polyacrylamide and gypsum to control phosphorus losses from biogas slurry applied soils[J]. *Chemosphere*, 2019(23): 953-961

- [10] Purakayastha T J, Bera, T, Bhaduri D, Sarkar B, Mandal S, Wade P, Kumari S, Biswas S, Menon M, Pathak H, Tsang D. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security [J]. *Chemosphere*, 2019(2227): 345-365
- [11] Manuela M I, Gabriela L A, Elena U, Luminita M. Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019(223): 115040
- [12] He D Y, Cui J, Gao M, Wang W Q, Zhou, J, Yang J, Wang J J, Li Y, Jiang C S, Peng Y. Effects of soil amendments applied on cadmium availability, soil enzyme activity, and plant uptake in contaminated purple soil[J]. *Science of The Total Environment*, 2019(6541): 1364-1371
- [13] Kumuduni N P, Sabry M. S, Season S. C, Daniel C W, Yohey H, Deyi H, Nanthi S B, Jörg R. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. *Environment International*, 2020 (134): 105046
- [14] Ahmed M, Gehad S, Gehan M, Khalifa R E, Eltaweil A S. Fabrication of novel iminodiacetic acid-functionalized carboxymethyl cellulose microbeads for efficient removal of cationic crystal violet dye from aqueous solutions [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020 (148): 1072-1083
- [15] Shi J X, Han Y X, Xu C Y, Han H J. Enhanced anaerobic degradation of selected nitrogen heterocyclic compounds with the assistance of carboxymethyl cellulose[J]. *Science of the Total Environment*, 2019(689): 781-788
- [16] Sima G, Morteza K, Mahmoud R, Dastmalchi S, Gharbani P. Response surface methodology (RSM) modeling to improve removal of Cr (VI) ions from tannery wastewater using sulfated carboxymethyl cellulose nanofilter [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019(208): 736-742
- [17] Angela A, Nicole F, Neils M, Neils M, Amanda S, Bulent M. Greenhouse tomato plant roots/carboxymethyl cellulose method for the efficient removal and recovery of inorganic phosphate from agricultural wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019(233): 258-263
- [18] Genovese G, Viccione F, Rossi D. Using the sodium carboxymethyl cellulose (CMC) as viscosity modifier to model the interstitial fluid in laboratory debris flows[J]. *Engineering Geology*, 2014(26): 179-186
- [19] 袁进科, 裴向军, 叶长文, 杨晴雯, 陈杰. 改性纤维素类聚合物固沙剂的吸附力学及崩解特性试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 144-150
- [20] Yuan J K, Pei X J, Ye C W, Yang Q W, Chen J. Adsorption mechanics and disintegration characteristics of modified cellulose polymer sand fixing agent[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 144-150 (in Chinese)
- [21] 裴向军, 罗阳楚君, 杨晴雯. 含水率及掺沙量对双聚材料改良碎石土性能的影响[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2018, 37(9): 48-52
- [22] Pei X J, Luoyang C J, Yang Q W. Impact of water content and sand content on performance of improved gravel soil with dimeric materials [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Sciences*, 2018, 37(9): 48-52 (in Chinese)
- [23] 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
- [24] 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 (in Chinese)
- [25] Kanmani P, Aravindn J, Kamaraj M, Karthikeyan S. Environmental applications of chitosan and cellulosic biopolymers: A comprehensive outlook [J]. *Bioresource Technology*, 2017 (242): 295-303
- [26] Ahmed M, Gehad S, Gehan M, Khalifa R E, Eltaweil A S. Fabrication of novel iminodiacetic acid-functionalized carboxymethyl cellulose microbeads for efficient removal of cationic crystal violet dye from aqueous solutions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020(148): 1072-1083
- [27] Lu S, Liu W B, Wang Y B, Zhang Y K, Li P Y, Jiang D Y, Fang C T, Li Y H. An adsorbent based on humic acid and carboxymethyl cellulose for efficient dye removal from aqueous solution[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019(135): 790-797
- [28] Song L, Liu F Q, Zhu C Q, Li A M. Facile one-step fabrication of carboxymethyl cellulose based hydrogel for highly efficient removal of Cr (VI) under mild acidic condition [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019(3691): 641-651
- [29] 邢磊, 杨世琦. 改性纤维素对盆栽小麦生长及土壤水分和养分的影响[J]. *西北农业学报*, 2019, 28(4): 536-545
- [30] Xing L, Yang S Q. Effects of modified cellulose on growth of potted wheat and soil moisture and nutrients [J]. *Acta Agriculture Boreali-Occidentalis Sinica*, 2019, 28(4): 536-545 (in Chinese)