

黄土高原新造耕地施用羧甲基纤维素钾的土壤效应

杨世琦^{1,2}, 王永杰^{1,2}, 颜鑫^{1,2}, 邢磊^{1,2}, 王惟帅^{1,2}, 郭萍^{1,2*}

(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:【目的】基于黄土高原新造耕地土壤质量改良需求, 开展以羧甲基纤维素钾 (CMC-K) 为土壤改良剂的田间定位试验研究, 为新造耕地土壤水分保持与养分改良提供依据。【方法】设置 CK (0 kg hm⁻²)、T1 (100 kg hm⁻²)、T2 (500 kg hm⁻²)、T3 (1000 kg hm⁻²) 和 T4 (2000 kg hm⁻²) 5 个处理, 对不同处理的新造耕地土壤水分、电导率与养分进行了测定与分析。【结果】新造耕地施用 CMC-K 土壤含水量提高 14.6%~121.7%, 在谷子生长季前期 (6 月和 7 月) 和后期 (10 月) 土壤保水功效较大。在 CMC-K 较高施用量 (1000~2000 kg hm⁻²) 情况下, 谷子生长季前期 (6 月) 土壤电导率提高了 37.3%~73.4%; 全部处理在谷子生长季后期 (10 月) 的土壤电导率显著降低, 降低幅度达 19.2%~21.8%; 谷子生长季的土壤电导率呈现降低趋势。施用 CMC-K 能够提高土壤硝态氮 9.6%~46.5%、速效磷 21.9%~207.9% 和速效钾 13.2%~95.9%, 对土壤 pH 基本没有影响。施用 CMC-K 谷子产量提高了 6.2%~19.2%。【结论】施用 CMC-K 能够保持土壤水分, 促进养分吸收利用, 提高谷子产量, 可以作为黄土高原新造耕地土壤改良剂使用, 推荐施用量约 100 kg hm⁻²。

关键词: 羧甲基纤维素钾; 新造耕地; 土壤水分; 土壤养分

中图分类号: S156.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2022)04-0858-08

DOI: [10.19336/j.cnki.trtb.2021032302](https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2021032302)

杨世琦, 王永杰, 颜鑫, 邢磊, 王惟帅, 郭萍. 黄土高原新造耕地施用羧甲基纤维素钾的土壤效应 [J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 858-865

YANG Shi-qi, WANG Yong-jie, YAN Xin, XING Lei, WANG Wei-shuai, GUO Ping. Effects of Application of Potassium Carboxymethyl Cellulose on Soil Water and Nutrients in Newly Cultivated Farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(4): 858-865

【研究意义】黄土高原丘陵沟壑区植被稀疏、雨季集中, 是水土流失极为严重的区域, 也是人地矛盾最为突出的地区之一^[1]。上世纪 60~90 年代基本农田建设主要表现为小规模梯田、坝地和小片水地, 生态建设主要以小流域综合治理, 总体上农业、生态与经济收效有限^[2]。1999 年国家实施“退耕还林(草)”工程, 生态环境不断改善, 植被覆盖率增加, 入黄泥沙减少^[3-6]。退耕还林取得了显著的生态效益, 但耕地面积减少, 仅 2000~2008 年耕地面积减少了 10.8%, 威胁区域粮食安全与农户生计^[7]。治沟造地是延安市的一项新举措, 对于在黄土高原地区增加耕地面积、保障粮食安全、保护生态环境、促进社会主义新农村建设都具有积极意义。【前人研究进展】延安等地部分区县率先开展了“治沟造地”工程^[8], 2009 年子长县率先试点, 2011 年推广到延

安市 8 个县, 2012 年累计达到 1.04 万 hm²^[9], 2018 年达到 3.63 万 hm², 建成高标准农田 2.79 万 hm², 新增耕地 0.76 万 hm²^[10]。新造耕地面临的主要问题是土壤养分贫瘠, 土质粗松, 加之当地生态环境脆弱, 不利于作物生长, 粮食产量受到威胁。因此, 加快新造耕地的土壤改良成为当务之急, 也是治沟造地工程可持续发展的重要保障。土壤改良剂是改善新造耕地土壤质量的有效途径, 通过对土壤水分与养分的固持作用提高水肥利用效率, 促进作物增产。上世纪 50 年代, 聚丙烯酰胺 (PAM) 也曾作为土壤改良剂, 在提高养分吸附量和减少淋溶损失方面具有一定效果^[11], PAM 及其复合物在水土流失治理与土壤侵蚀控制方面也具有较好效果^[12-17], 但 PAM 降解中间产物丙烯酰胺有毒, 污染环境^[18]。近年来, 国外文献中的土壤改良剂涉及材料类型很多,

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2022-01-11

基金项目: “十三五”重点研发课题 (2017YFD0800504) 资助

作者简介: 杨世琦 (1970-), 男, 陕西人, 博士, 研究员, 从事农业面源污染研究。E-mail: shiqiang@126.com

*通讯作者: E-mail: guoping@caas.cn

如高分子合成材料、腐殖质、粘土矿物、粉煤灰和膨润土等,除了土壤水分和养分改良外,也涉及土壤重金属修复和盐碱改良等^[19-22]。【**本研究切入点**】羧甲基纤维素钾(Potassium carboxymethyl cellulose, CMC-K)是基于羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)的改性产品,与 CMC-Na 化学性能与功能相似,具有吸湿性强、易溶于水和光、热稳定性好等优点,是天然纤维素经过化学改性得到的一种水溶性纤维素醚^[23]。用 CMC-K 替代 CMC-Na 做土壤改良剂主要考虑到 CMC-Na 中的钠离子产生土壤累积,可能导致土壤盐碱化风险;同时,钾离子还是作物生长的必需元素,兼具肥料功能。CMC-K 生产原料天然生物基材料纤维素在自然界中分布最广,也是最丰富的天然高分子可再生资源,占植物界碳含量的 50% 以上;羧甲基纤维素降解后转变成土壤有机质,无环境污染风险,因此,CMC-K 也具有新型绿色环保土壤改良剂的潜质。【**拟解决的问题**】本试验研究是基于黄土高原新造耕地土壤改良和农业绿色投入品需求,首次开展 CMC-K 土壤改良田间试验,揭示 CMC-K 施用下的农田土壤水分、养分与作物生长变化规律,为 CMC-K 的农业应用提供科学依据。

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°52'28.10"N, 109°13'36.06"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 °C,降水量约 506 mm,主要集中在 7~9 月,年日照时数为 2396 h,日照百分率 54%,平均海拔 1219 m。试验地为 3 龄新造耕地(第三年撂荒),位于梁峁顶部,为自上而下的第二级梯田,一面靠坡,三面临崖,光照充足。2018 年试验前,土壤耕层(0~20 cm)基本理化性状:全氮 0.38 g kg⁻¹、全磷 0.37 g kg⁻¹、全钾 14.90 g kg⁻¹、硝态氮 2.90 mg kg⁻¹、有效磷 0.11 mg kg⁻¹、速效钾 38.10 mg kg⁻¹、pH 8.46、土壤有机质 8.50 g kg⁻¹、土壤容重 1.35 g cm⁻³。2018 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 月降水量 78.3 mm,7 月降水量 194.1 mm(其中 1~21 日降水量 190.2 mm),8 月 58.4 mm,9 月降水量 74.0 mm,10 月上旬降水量

0.0 mm。2019 年降水量 548.9 mm,6~10 月降水量 475.1 mm,占全年降水量的 86.6%。其中,6 月降水量 56.0 mm,7 月降水量 150.2 mm,8 月降水量 113.4 mm,9 月降水量 105.1 mm,10 月降水量 50.4 mm。

1.2 试验设计及方法

田间试验小区为 4 m × 6 m,小区以土埂间隔。供试材料羧甲基纤维素钾,化学名称 CMC-K,粘度 800 mPa s⁻¹(25 °C),弱碱性,钾的质量百分数为 13%,供试小样纯品由北京理工大学提供。试验设置 CK(0 kg hm⁻²)、T1(100 kg hm⁻²)、T2(500 kg hm⁻²)、T3(1000 kg hm⁻²)和 T5(2000 kg hm⁻²)5 个处理,3 次重复。2018 年 5 月 10 日整地播种,10 月 9 日收获;2019 年 5 月 5 日整地播种,10 月 7 日收获;田间生长期约 150 d。2018 年播种前,一次性施入复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:14:16)2400 kg hm⁻²与羊粪约 3000 kg hm⁻²[有机质 24.3%,含氮(N)0.7%,磷(P₂O₅)0.47%,钾(K₂O)0.44%];2019 年播种前,一次性施入复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:14:16)2400 kg hm⁻²。种植作物为谷子,行距 30 cm;品种为晋谷 40,播种量 7.5 kg hm⁻²;出苗后按株距 10 cm 定苗。苗高 10 cm 时,在行间开沟 5 cm 深施材料。

采用 TDR350 测定 0~20 cm 土层的土壤水分含量和电导率。采用 AA3 流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量;KOAc 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;NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定全磷含量;NaOH 熔融—火焰光度法测定全钾含量;重铬酸钾容量法—外加热法测定有机质含量;梅特勒—托利多 pH 计将水土比按照 5:1 比例充分震荡静置后测 pH。土钻取样深度 20 cm,每小区沿对角线取三处,混合后塑封袋带回实验室检测,取样时间与收获期同步进行。

数据整理分析采用 Microsoft Excel 2013 与 Origin 8.5,选用 SPSS16.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。

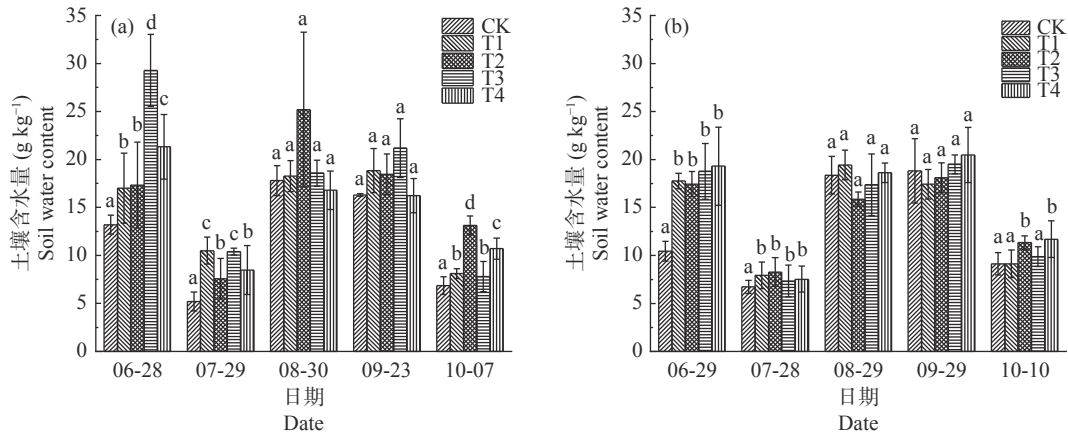
2 结果与分析

2.1 土壤水分

施用 CMC-K 在不同处理及不同时期的农田土壤含水量变化见图 1a(2018)和 1b(2019)。2018 年,6 月下旬,全部处理的土壤含水量与对照达到显著差异,T1、T2、T3 和 T4 比对照增加 28.8%、31.3%、

121.7% 和 61.6%，其中 T1 和 T2 差异不显著。7 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照达到显著差异，T1、T2、T3 和 T4 比对照增加 101.9%、45.6%、100.1% 和 62.9%。8 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照差异不显著。9 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照差异不显著。10 月上旬全部处理的土壤含水量与对照达到显著差异，T1、T2、T3 和 T4 比对照增加 18.2%、91.7%、14.6% 和 56.2%。从全生育期看，前期（7 月之前）CMC-K 处理的土壤保水效果显著，中期（7~9 月）CMC-K 处理没有显著差异，但土壤含水量总体处于较高水平；末期（10 月）CMC-K 处理的土壤保水效果也很显著。由此可见，CMC-K 处理的土壤保水功效主要发生在谷子生长季

前期，其次是后期，中期保水功能丧失；在谷田土壤水分较低时期，CMC-K 才发挥土壤保水功效。CMC-K 的土壤保水功能在 2019 年的重复试验中得到验证。6 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照达到显著差异，T1、T2、T3 和 T4 比对照增加 70.0%、66.8%、79.6% 和 84.7%。7 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照达到显著差异，T1、T2、T3 和 T4 比对照增加 17.8%、22.9%、8.9% 和 11.9%。8 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照差异不显著。9 月下旬，全部处理的土壤含水量与对照差异不显著。10 月上旬，除 T1 和 T3 外的其它处理与对照达到显著差异，T2 和 T4 比对照增加 24.0% 和 28.0%；T2 与 T4 差异不显著。



注:a、b 和 c 表示同一时期不同处理间的显著差异性 ($P < 0.05$)

图 1 施用 CMC-K 对农田土壤含水量的影响
Fig.1 Effect of application of CMC-K on soil water content

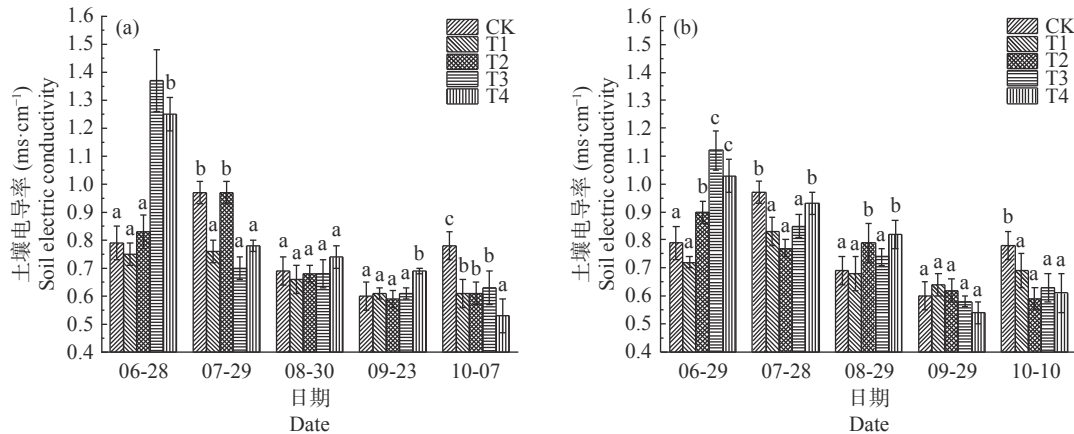
2.2 土壤电导率

施用 CMC-K 在不同处理及不同时期的农田土壤电导率变化见图 2a (2018) 和 2b (2019)。2018 年，6 月下旬，除 T1 和 T2 外的其它处理土壤电导率与对照达到显著差异，T3 和 T4 的土壤电导率在谷子生长季处于较高值。7 月下旬，除 T2 外的其它处理土壤电导率与对照达到显著差异，均低于对照。8 月下旬，全部处理的土壤电导率与对照不显著。9 月下旬，除 T4 外的其它处理的土壤电导率与对照差异不显著。10 月上旬，全部处理的土壤电导率与对照达到显著差异，均低于对照。2019 年，6 月下旬，除 T1 外的其它处理的土壤电导率与对照达到显著差异，该时段土壤电导率也相对较高。7 月下旬，除 T4 外的其它处理土壤电导率与对照达到显著差异。8 月下旬，除 T1 和 T3 外的其它处理土壤电导率与对照达

到显著差异。9 月下旬，全部处理的土壤电导率与对照不显著。10 月上旬，全部处理的土壤电导率与对照达到显著差异，均低于对照。从两年的试验结果看，土壤电导率表现出两个变化规律：一是随谷子生长季推移，土壤电导率呈现下降趋势。土壤电导率是反映土壤浸出液中阳离子和阴离子数量指标，一定程度上能够反映土壤养分状况。土壤电导率降低趋势表明土壤养分也在逐渐减少。二是 CMC-K 处理在前期（6 月下旬）较高的 CMC-K 施用量 T3 和 T4 处理显著高于对照与较低的 CMC-K 施用量 T1 和 T2 处理，比对照增加 37.3%~73.4%；中期（8 月下旬和 9 月下旬）处理与对照差异不显著的情况更多一些（尤其是 2018 年的 8 月下旬和 2019 年的 9 月下旬）；全部处理的土壤电导率在谷子生长季后期（10 月上旬）显著低于对照，比对照降低 19.2%~

21.8%。不同处理之间在不同时期的土壤电导率变化存在一定的差异性, 主要原因是土壤电导率除土壤

盐分外, 还受土壤水分、温度、有机质和质地结构的影响, 导致处理之间土壤电导率结果相对复杂。



注: a、b 和 c 表示同一时期不同处理间的显著差异性 ($P < 0.05$)

图2 施用 CMC-K 对农田土壤电导率的影响

Fig.2 Effect of application of CMC-K on soil electric conductivity

2.3 土壤养分

施用 CMC-K 对农田土壤养分状况的影响见表 1。从两年的试验结果看, 施用 CMC-K 对土壤全氮、全磷和全钾基本没有影响, 但能够提高土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量。2018 年, T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤硝态氮分别提高 9.6%、13.2%、38.7% 和 46.5%; T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤速效磷分别提高 207.9%、50.0%、63.2% 和 792.1%; T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤速效钾分别提高 25.7%、13.2%、45.6% 和 63.9%。2019 年, T1、T2、T3 和 T4 处理

的土壤硝态氮分别提高 14.1%、28.7%、34.5% 或 44.4%; T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤速效磷分别提高 34.2%、56.1%、21.9% 和 65.9%; T1、T2、T3 和 T4 处理的土壤速效钾分别提高 22.3%、37.9%、84.6% 和 95.9%。由于 CMC-K 具有吸水性和粘性, 对土壤的速效养分离子具有一定的吸附功能, 能够减少土壤养分损失; 与此同时, 由于 CMC-K 中含有钾离子, 因而具有一定钾肥功能, 对提高土壤钾含量和供给作物吸收利用均有作用。试验结果表明, 施用 CMC-K 对土壤 pH 无显著影响。

表 1 施用 CMC-K 对农田土壤氮磷钾养分的影响

Table 1 Effect of application of CMC-K on soil nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) contents

处理 Treatment	全氮 (g kg^{-1}) Total N	全磷 (g kg^{-1}) Total P	全钾 (g kg^{-1}) Total K	硝态氮 (mg kg^{-1}) Nitrate N	速效磷 (mg kg^{-1}) Available P	速效钾 (mg kg^{-1}) Available K	pH
2018							
CK	0.57 ± 0.02 a	0.48 ± 0.02 b	15.78 ± 0.20 a	4.68 ± 0.44 a	0.38 ± 0.04 a	45.33 ± 2.52 a	8.38 ± 0.03 a
T1	0.54 ± 0.09 a	0.34 ± 0.09 a	17.32 ± 0.34 c	5.13 ± 0.35 b	1.17 ± 0.13 c	57.00 ± 5.00 b	8.39 ± 0.04 a
T2	0.52 ± 0.06 a	0.42 ± 0.06 b	17.01 ± 0.73 c	5.30 ± 0.12 b	0.57 ± 0.12 b	51.33 ± 3.51 b	8.25 ± 0.12 a
T3	0.61 ± 0.02 a	0.40 ± 0.02 b	17.40 ± 0.46 c	6.49 ± 0.27 c	0.62 ± 0.36 b	66.00 ± 3.61 c	8.38 ± 0.26 a
T4	0.59 ± 0.02 a	0.44 ± 0.02 b	16.34 ± 0.34 b	6.85 ± 0.19 c	3.39 ± 0.24 d	74.33 ± 3.21 d	8.34 ± 0.04 a
2019							
CK	0.56 ± 0.02 a	0.45 ± 0.02 a	16.12 ± 0.20 a	4.46 ± 0.44 a	0.41 ± 0.04 a	47.14 ± 2.52 a	8.38 ± 0.03 a
T1	0.58 ± 0.06 a	0.45 ± 0.06 a	16.02 ± 0.68 a	5.09 ± 0.38 b	0.55 ± 0.10 b	57.67 ± 1.53 b	8.37 ± 0.04 a
T2	0.57 ± 0.01 a	0.45 ± 0.01 a	16.58 ± 0.37 a	5.74 ± 0.08 c	0.64 ± 0.13 c	65.00 ± 4.00 c	8.32 ± 0.06 a
T3	0.58 ± 0.05 a	0.44 ± 0.05 a	16.43 ± 0.17 a	6.00 ± 0.52 c	0.50 ± 0.02 b	87.00 ± 5.29 d	8.35 ± 0.03 a
T4	0.60 ± 0.02 a	0.47 ± 0.02 a	16.87 ± 0.09 a	6.44 ± 0.76 c	0.68 ± 0.03 c	92.33 ± 8.50 e	8.33 ± 0.04 a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

2.4 谷子产量

施用 CMC-K 能够促进谷子增产 (图 3)。2018 年, 全部处理的谷子产量与对照达到显著差异, T1、T2、T3 和 T4 比对照增产 7.5%、6.2%、14.1% 和

12.1%, T1 与 T2 差异不显著, T3 与 T4 差异不显著。2019 年, 全部处理的谷子产量与对照达到显著差异, T1、T2、T3 和 T4 比对照增产 10.2%、12.3%、19.2% 和 17.6%, T1 与 T2 差异不显著, T3 与 T4 差异不显

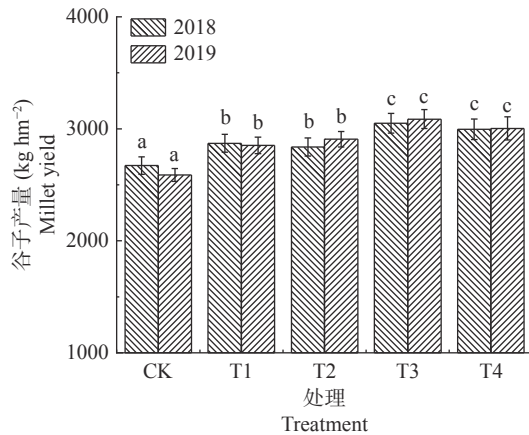


图 3 施用 CMC-K 对谷子产量的影响

Fig.3 Effect of application of CMC-K on millet yield

表 2 CMC-K 用量与各土壤性质指标间相关性分析(Pearson 相关系数)

Table 2 Correlation analysis between CMC-K and various indicators (Pearson correlations coefficient)

	CMC-K 施用量 CMC-K application rate	土壤含水量 Soil water content	土壤电导率 soil electric conductivity	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	硝态氮 Nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有效钾 Available potassium	产量 Yield
CMC-K 施用量	1	0.5587*	-0.3807	-0.0277	0.1772	0.2494	0.9159*	0.5776*	0.8341*	0.7180*
土壤含水量		1	-0.3368	0.2698	-0.3144	0.6132*	0.8059*	0.2704	0.4792	0.8142*
土壤电导率			1	0.3907	0.2959	-0.5030	-0.4091	-0.5390*	-0.0085	-0.1453
全氮				1	0.2327	0.0739	0.0555	-0.6686*	0.2834	0.1987
全磷					1	-0.7473*	-0.0280	-0.1476	0.1335	-0.2113
全钾						1	0.4168	0.0145	0.2448	0.5123*
硝态氮							1	0.5543*	0.8032*	0.8861*
有效磷								1	0.2443	0.3046
有效钾									1	0.8347*
产量										1

注：“*”表示0.05显著性水平。

3 讨论

3.1 施用 CMC-K 对土壤水分的影响

CMC-K 具有较强的吸水性,能够吸附自身几十倍至几百倍的水量。农田施用能够吸附和保持土壤水分。从试验结果看,随 CMC-K 施用量的增加,土壤含水量并未出现成倍增加的趋势,也未出现随谷子生长季延续土壤含水量增加的趋势。主要原因:一是土壤缺乏足够的水分供应,材料的吸水潜力未能充分发挥出来;二是由于材料与土壤颗粒均匀混合后,引起改材料的吸水能力显著降低;三是 CMC-K 的土壤水分吸附与释放同时存在,没有出现土壤水分过度吸附,也没有出现土壤水分恒定不变,而是生长季前期低、中期高和后期低变化过程。试验结果还表明,在土壤含水量较低的情况下,施用 CMC-K 的土壤保水效果明显;在土壤含水量较高的情况下,CMC-K 的土壤保水优势显著降低。2018 年,田间试验的对照土壤含水量高于 16.3 g kg^{-1} 情况下,全部处

理与对照差异性消失;2019 年,田间试验的对照土壤含水量高于 18.3 g kg^{-1} 情况下,全部处理与对照差异性消失。这一结果表明,CMC-K 具有较好的土壤保水效果,在干旱地区或干旱季节的土壤保水功效更强。CMC-K 作为土壤改良剂的田间试验尚属首次,关于土壤中的水分吸附机理与吸附过程需要进一步研究。CMC-K 施用量与不同时期的土壤含水量的线性回归分析结果表明,仅在 6 月和 7 月达到显著差异 ($P < 0.05$),其它时期均未达到显著差异 ($P > 0.05$)。

2.5 施用 CMC-K 与考察指标的相关性分析

从表 2 可以看出,CMC-K 施用量与土壤含水量、硝态氮、有效磷、有效钾含量和谷子产量之间呈显著正相关关系,表明施用 CMC-K 能够影响黄土高原新造耕地的土壤水分和土壤养分状况,对改善土壤水分、养分以及提高谷子产量有一定贡献,具备土壤改良功能。与此同时,谷子产量与土壤含水分、土壤全钾、硝态氮和有效钾达到显著相关,表明在施用 CMC-K 情况下,新造耕地的土壤质量得到较大改善,谷子对土壤水分与养分的利用效率有一定的提高。

理与对照差异性消失;2019 年,田间试验的对照土壤含水量高于 18.3 g kg^{-1} 情况下,全部处理与对照差异性消失。这一结果表明,CMC-K 具有较好的土壤保水效果,在干旱地区或干旱季节的土壤保水功效更强。CMC-K 作为土壤改良剂的田间试验尚属首次,关于土壤中的水分吸附机理与吸附过程需要进一步研究。CMC-K 施用量与不同时期的土壤含水量的线性回归分析结果表明,仅在 6 月和 7 月达到显著差异 ($P < 0.05$),其它时期均未达到显著差异 ($P > 0.05$)。

3.2 施用 CMC-K 对土壤电导率的影响

土壤电导率表示土壤浸出液中各种阳离子的量和各种阴离子的量之和,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)、土壤温度和 pH 以及农作物吸收利用等因素影响,只可作为评价土壤养分状况评价的参考。从试验结果看,在土壤水分相对充足的谷

子生长初期,较高 CMC-K 施用量显著提高了土壤电导率;在土壤含水量较低的情况下,施用 CMC-K 会导致土壤黏度降低,土壤离子移动困难,因而土壤电导率降低;中后期,可能由于谷子对土壤养分的吸收利用,土壤养分离子浓度均有降低,加上新造耕地的土壤养分本身匮乏,土壤电导率总体上有较大的下降。在谷子收获期,全部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,这一点可以从处理的谷子产量较对照高而得到证实。CMC-K 施用量与不同时期的土壤电导率的线性回归分析结果表明,仅在 6 月达到显著差异 ($P < 0.05$),其它时期均未达到显著差异 ($P > 0.05$)。

3.3 施用 CMC-K 对土壤养分的影响

施用 CMC-K 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中得到一定反映。从试验开始与结束的土壤样品的养分检测结果来看,处理的土壤养分均有不同程度的降低,表明土壤养分得到不同程度的吸收利用,而且处理的养分利用率较对照要高,这个推断可以从处理的谷子产量较对照高得到验证。由此可见,CMC-K 具有作为新造耕地土壤改良剂的潜质。CMC-K 施用量与土壤养分的线性回归分析结果表明,全氮、全磷和全钾未达到显著差异 ($P > 0.05$),硝态氮、有效磷和有效钾达到显著差异 ($P < 0.05$)。在实验室条件下,也证实了 CMC-K 能够吸附水体环境的 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^[22]。关于羧甲基纤维素及其衍生材料都具有较强的离子吸附功能的研究较多,如 CMC/PEI(聚乙烯亚胺)水凝胶和硫酸羧甲基纤维素纳米滤膜 (SCMC-GA-NF) 能够提高 Cr^{5+} 去除率^[24-26],CMC 基 Fe_3O_4 纳米材料极大提高了 Pb(II) 吸附能力^[27],CMC 能够显著去除农业废水中的磷^[28],CMC 和丙烯酰胺 (AM) 的接枝共聚物材料的悬浮物去除功能显著提升^[29]。

4 结论

(1) 黄土高原新造耕地施用 CMC-K 能够提高谷子生长季前期 (6 月和 7 月) 和后期 (10 月) 的土壤含水量 14.6% ~ 121.7%,对中期 (8 月和 9 月) 土壤含水量影响不大。

(2) 黄土高原新造耕地在较高 CMC-K 施用量

(1000 ~ 2000 kg hm^{-2}) 情况下,谷子生长季前期 (6 月) 土壤电导率显著提升、提升幅度达 37.3% ~ 73.4%,较低 CMC-K 施用量与对照无显著差异;全部处理在谷子生长季后期 (10 月) 土壤电导率显著降低、降低幅度达 19.2% ~ 21.8%;总体上谷子生长季的土壤电导率呈现降低趋势。

(3) 黄土高原新造耕地施用 CMC-K 对土壤全氮、全磷和全钾含量基本没有影响,但能够提高土壤硝态氮、速效磷和速效钾含量,提高幅度分别达到 9.6% ~ 46.5%、21.9% ~ 207.9% 和 13.2% ~ 95.9%。

(4) 黄土高原新造耕地施用 CMC-K 能够提高土壤水分含量,改善作物生长土壤环境,促进土壤养分吸收利用,有助于谷子增产;CMC-K 作为土壤改良剂在黄土高原新造耕地上的推荐施用量为 100 kg hm^{-2} 。

参考文献:

- [1] 傅伯杰,陈利顶,邱扬,等.黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程[M].北京:商务印书馆,2002.
- [2] 苏仲仁,王晶.全国八大重点治理区水土保持效益分析[J].中国水土保持,1992,(3):1-4.
- [3] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2014, 119(12): 2261 - 2275.
- [4] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739 - 741.
- [5] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, (9): 38 - 41.
- [6] Lu Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): 1 - 10.
- [7] 周卫健,安芷生.实施与“退耕还林还草”并重的“治沟造地”重大方针的建议[N].中国科学报,2014-09-19.
- [8] 周怀龙,王文昭,郝占东.治沟造地惠民生,再造陕北好江南[N].中国国土资源报,2012-11-16.
- [9] 张信宝,金钊.延安治沟造地是黄土高原淤地坝建设的继承与发展[J].地球环境科学,2015,6(4):261-264.
- [10] 延安治沟造地:千沟万壑变良田, http://sn.ifeng.com/a/20190928/7766055_0.shtml, 2019-09-28.
- [11] LI 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.
- [12] Chang A, Yang P L, Zeng W Z, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing[J]. *Geoderma*, 2019, 353: 372 - 381.

- [13] Min Z, Zhen H, Ji H D, et al. 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.
- [14] Eiham A, Hohat E, Mohammad R, et al. Shear strength of an unsaturated loam soil as affected by vetiver and polyacrylamide[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104331.
- [15] Tadayonnejad M, Mosaddehi M, Ghorbani S. 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.
- [16] Chen Z, Wang R X, Hang P Y, et al. 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.
- [17] Christophen N, Liang X Q, Shan S D, et al. Synergistic effects of anionic polyacrylamide and gypsum to control phosphorus losses from biogas slurry applied soils[J]. *Chemosphere*, 2019, 23: 953 – 961.
- [18] 陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展[J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 1282 – 1289.
- [19] Purakayastha T, Bera T, Bhaduri D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security, *Chemosphere*, 2019, 2227: 345 – 365.
- [20] Manuela M, Gabriela L, Elena U, et al. Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115040.
- [21] He D Y, Cui J, Gao M, et al. 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.
- [22] Kumuduni N, Sabry M, SEASON S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. *Environment International*, 2020, 134: 105046.
- [23] <https://baike.baidu.com/item/%E7%BE%A7%E7%94%B2%E5%9F%BA%E7%BA%A4%E7%BB%B4%E7%B4%A0%E9%92%A0/1546832?fr=aladdin>
- [24] 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.
- [25] Ahmed M, Gehad S, Gehan M, et al. 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.
- [26] Lu S, Liu W B, Wand Y B, et al. 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.
- [27] Shi J X, Han Y X, Xu C Y, et al. Enhanced anaerobic degradation of selected nitrogen heterocyclic compounds with the assistance of carboxymethyl cellulose[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 781 – 788.
- [28] Song L, Liu F Q, Zhu C Q, et al. 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] Sima G, Morteza K, Mahmoud R, et al. 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.

Effects of Application of Potassium Carboxymethyl Cellulose on Soil Water and Nutrients in Newly Cultivated Farmland

YANG Shi-qi^{1,2}, WANG Yong-jie^{1,2}, YAN Xin^{1,2}, XING Lei^{1,2}, WANG Wei-shuai^{1,2}, GUO Ping^{1,2*}

(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, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] Based on the requirement of soil water and nutrient improvement of newly cultivated farmland of Loess Plateau in Yanan, Shaanxi Province, potassium carboxymethyl cellulose (CMC-K) was acted as a soil amendment. [Method] The field experiment was conducted with 5 treatments (CK, 0 kg hm⁻²; T1, 100 kg hm⁻²; T2, 500 kg hm⁻²; T3, 1000 kg hm⁻²; T4, 2000 kg hm⁻²) to research the changes in soil water, soil electric conductivity and soil nutrients. [Result] CMC-K application improved soil water content 14.6%-121.7% in newly cultivated farmland, the efficacy of CMC-K application was better in early (June and July) and end-stage (October) of millet growing season than those in the middle stage (August and September). The large CMC-K application amounts (1000-2000 kg hm⁻²) could improve significantly soil electric conductivity by 37.3%-73.4% in early (June) of millet growing season, and soil electric conductivities of all treatments were decreased significantly by 19.2%-21.8% in end (October) of millet growing season. Soil electric conductivities presented decreasing trend in the millet growing season. CMC-K application had no effects on soil total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and pH, but enhanced soil nitrate (9.6%-46.5%), available phosphorus (21.9%-207.9%), and available potassium (13.2%-95.9%). CMC-K application could increase millet yield by 6.2%-19.2%. [Conclusion] CMC-K application can hold soil water, promote soil nutrient absorption and raise millet yield in newly cultivated farmland in Loess Plateau, which may act as a soil amendment and the recommended application rate is 100 kg hm⁻².

Key words: Potassium carboxymethyl cellulose (CMC-K); Newly cultivated farmland; Soil water; Soil nutrient

[责任编辑: 刘轶飞]