

# 喷施羧甲基纤维素钾对宁夏引黄灌区土壤及其作物的影响

王永杰<sup>1,2</sup> 颜鑫<sup>1,2</sup> 王英<sup>3</sup> 刘根红<sup>3</sup> 杨世琦<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;

3. 宁夏大学 农学院,银川 750021)

**摘要** 为探讨羧甲基纤维素钾(CMC-K)对农田土壤水温环境、土壤养分吸收和作物产量的影响,以宁夏引黄灌区为研究对象,饲草燕麦为供试作物 CMC-K 为供试材料,采用田间试验,设置 CMC-K 喷施量 0 kg/hm<sup>2</sup> (CK)、50 kg/hm<sup>2</sup> (T1)、100 kg/hm<sup>2</sup> (T2)、200 kg/hm<sup>2</sup> (T3)和 300 kg/hm<sup>2</sup> (T4)共 5 个处理,研究其对灌区土壤理化性质、土壤养分以及作物产量的影响。同时,测定不同处理中土壤含水量、温度、电导率、容重和土壤养分等,分析 CMC-K 对饲草燕麦产量的影响,以及分析 CMC-K 施用量与土壤理化性质、养分和饲草燕麦产量的相关性。结果表明:土壤含水量随着 CMC-K 的喷施量增大而增加,在作物拔节期可使土壤含水量提高 39.78%~116.80%; CMC-K 可以为作物生育期贡献积温 48.4~114.4 °C,能够显著提高土壤温度;喷施 CMC-K 有助于土壤养分保持,在 0~10 cm 土层能够提高全钾和速效钾含量 28.31%~63.07%和 34.72~95.45%,在 10~20 cm 土层可以提高全钾和速效钾含量 12.30%~75.05%和 25.65%~125.37%,对有效磷具有固持作用,同时对水解性氮影响明显,可以将水解性氮聚集在上层土壤;对饲草燕麦产量影响显著,提高 18.80%~54.11%;CMC-K 喷施量与土壤全钾、速效钾含量、土壤含水量以及燕麦产量表现显著正相关,相关系数分别达到 0.917、0.982、0.676 和 0.983。综上所述,在本试验条件下,当 CMC-K 喷施量为 200 kg/hm<sup>2</sup> 时,可以显著提高土壤含水量、温度,影响土壤养分,有助于提升土壤全钾和速效钾含量,固持水解性氮,减少养分的淋溶,考虑其经济效益,推荐施用量为 100 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词** 羧甲基纤维素钾;宁夏引黄灌区;土壤;饲草燕麦;产量

中图分类号 S03

文章编号 1007-4333(2022)06-0215-10

文献标志码 A

## Effects of spraying carboxymethyl cellulose potassium on soil properties and crops in Ningxia Yellow River Irrigation Area

WANG Yongjie<sup>1,2</sup>, YAN Xing<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>3</sup>, LIU Genhong<sup>3</sup>, YANG Shiqi<sup>1,2\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Environment and Climate Change of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;

3. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract** To investigate the effects of carboxymethyl cellulose potassium (CMC-K) on improving soil water temperature environment, soil nutrient absorption and crop yield in Ningxia Yellow River Irrigation Area (NYRIA), forage oat was taken as the test crop and carboxymethyl cellulose potassium (CMC-K) was used as the test material. A field experiment was carried out, and CMC-K was sprayed at 0 kg/hm<sup>2</sup> (CK), 50 kg/hm<sup>2</sup> (T1), 100 kg/hm<sup>2</sup> (T2), 200 kg/hm<sup>2</sup> (T3) and 300 kg/hm<sup>2</sup> (T4) kg/hm<sup>2</sup>, and their effects on soil physical and chemical properties, soil nutrients and crop yield in irrigated area were studied. By measuring soil water content, temperature, electrical conductivity, bulk density and soil nutrients, the effects of CMC-K on the yield of forage oat and the correlation between CMC-K application, soil physical and chemical properties, soil nutrients and forage oat yield were analyzed. The results are as

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2019BBF02007)

第一作者: 王永杰, 硕士研究生, Email: wangyongjie317@126.com

通讯作者: 杨世琦, 教授, 主要从事农业清洁流域及改性纤维素材料在农业的应用研究, Email: shiqiyang@126.com

follows: The soil water content increased with the increase of the amount of CMC-K, and the soil water content increased 39.78% – 116.80% at the jointing stage. The accumulated temperature contributed 48.4 – 114.4 °C during crop growth period, and increased soil temperature significantly. Soil layer 0 – 10 cm was beneficial to soil nutrient conservation. The contents of total K and available K were increased by 28.31% – 63.07% and 34.72 – 95.45% in soil layer 0 – 20 cm, total k and available K contents were increased by 12.30% – 75.05% and 25.65% – 125.37%, indicating that CMC-K had a fixation effect on available P and a significant effect on hydrolyzed N. The yield of forage oat was increased significantly by 29.9% – 62.47%. There was a significant positive correlation between CMC-K application soil total K, available K content, soil water content and oat yield, and the correlation coefficients were 0.917, 0.982, 0.676 and 0.983, respectively. Under the experimental conditions in this study, when the application amount of CMC-K was 200 kg/hm<sup>2</sup>, soil water content, temperature, and soil nutrients were affected, soil total potassium and available potassium contents were increased, hydrolyzed nitrogen was retained, nutrient leaching was reduced. Considering its economic benefit, the final recommended amount was 100 kg/hm<sup>2</sup>. This research provided a basic theory for the application of CMC-K in NYRIA.

**Keywords** potassium carboxymethyl cellulose; Ningxia Yellow River Irrigation Area; soil; forage oat production

羧甲基纤维素应用于新材料开发的潜力很大,以此为基础的化工材料和产品很多,用途十分广泛,主要有化工、医学和食品科学领域,环境科学领域应用很少,在农业领域的应用才刚刚开始。改性纤维素材料是依靠纤维素表面的羟基通过引入官能团或者其他元素改变纤维素部分化学结构和性能使其成为具有特殊功能的大分子物质<sup>[1]</sup>。改性后的纤维素在保持原有优良特性的基础上又具有引入官能团或其他元素赋予的新性能,在众多改性纤维素材料中,用量较大和用途较为广泛的是羧甲基纤维素钾(Potassium carboxymethyl cellulose, CMC-K)、羧甲基纤维素钠(Sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)以及羧甲基纤维素铵(Ammonium carboxymethyl cellulose, CMC-NH<sub>4</sub>)。改性纤维素材料 CMC-Na、CMC-K 和 CMC-NH<sub>4</sub> 首次作为土壤改良剂,应用在黄土高原新造耕地上能够改善土壤理化性状,提高水土保肥性能,提升新造耕地作物产量<sup>[2]</sup>。邢磊的研究结果表明,上述研究发现 3 种改性羧甲基纤维素材料通过洒施方式,提高新造耕地土壤含水量 8.40%~22.80%,提高谷子产量 6.70%~7.50%,能够提高土壤氮磷养分含量,其中:CMC-K 可以增加土壤有效钾含量;CMC-NH<sub>4</sub> 可以增加土壤碱解氮含量;随着改性材料施用量的增加,土壤改良效果显著提升,推荐施用量为 100 kg/hm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。

羧甲基纤维素钾(CMC-K)无臭、无味、无毒;可溶于冷水或热水,形成具有一定粘度的透明溶液,其水溶液具有增稠、成膜、黏接、水分保持、胶体保护、乳化及悬浮等特性。CMC-K 的生产原料为纤维

素,作为天然基吸附剂,纤维素来源十分广泛,包括绿色的陆生、海底植物和动物体内,种类繁多,其在地球上年产量也高达 750 亿 t<sup>[3]</sup>,占植物界碳含量 50%以上。此外,纤维素是一种可再生资源,是目前地球上最为丰富的资源。

宁夏引黄灌区位于宁夏回族自治区中北部,南北长 320 km,东西宽 40 km,总面积 6 600 km<sup>2</sup>,整体呈南高北低、西高东低走向。宁夏引黄灌区地处中温带干旱区,大陆性气候,干旱少雨,平均年降水量 289 mm,蒸发量 1 250 mm,水资源短缺且时空分布不均。灌区农田土壤质地较砂松,灌淤土疏松多孔,有机质含量较低约 1%,土壤保水保肥能力差,易发土壤养分淋溶,导致土壤氮素含量较低和有效磷不足,降低养分利用效率,其中灌区代表性作物水稻和玉米的氮肥利用率 22.4%与 23.5%,灌溉水利用率 0.3 低于全国平均水平 0.45<sup>[4-6]</sup>。

由于改性纤维素材料在农业领域刚刚起步,此前的研究报道尚少,根据其独特的性质和宁夏引黄灌区存在水温环境不好的问题。本研究拟以改性纤维素 CMC-K 为例,采用喷施方式,设置不同喷施量为不同处理,调查不同喷施量对灌区土壤和作物的影响,以期灌区的粮食生产、改善种植结构发展提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2020 年 6—11 月在宁夏回族自治区银川市平吉堡镇平吉堡农场试验田(38°25′25″ N, 106°1′45″ E,平均海拔 1 100 m)进行。该地属中温

带大陆性气候,年平均气温 8.5℃,日温差 12~15℃,年平均日照时数 2 800~3 000 h,年平均降水量 203 mm,无霜期 157 d 左右,土壤质地为沙壤土(砂粒 74%、粉粒 15%、黏粒 11%),土壤类型为灌淤土。试验地土壤耕层(0~20 cm)化学性质如下:pH 8.90;有机质含量为 13.05 g/kg;全氮含量为 0.80 g/kg;全磷含量为 0.74 g/kg;铵态氮含量为 0.96 mg/kg;硝态氮含量为 4.30 mg/kg;速效磷含量为 13.39 mg/kg;速效钾含量为 90.09 mg/kg。

## 1.2 试验材料

供试品种为当地燕麦主推饲草燕麦品种‘甜燕1号’,生育期 110 d。供试材料为羧甲基纤维素钾(CMC-K),由北京理工大学材料学院提供,基本性质如下:钾含量为 24.4%;碳含量为 27.5%;1%B 型粘度(25℃)为 300~800 mPa·s;取代度为 0.6~0.8;干燥减量≤10%;pH 9~11;质量分数为 13.7%;形态为白色絮状。

## 1.3 试验设计及方法

本研究 CMC-K 施用量共设置 5 个处理,分别为 0 kg/hm<sup>2</sup> (CK)、50 kg/hm<sup>2</sup> (T1)、100 kg/hm<sup>2</sup> (T2)、200 kg/hm<sup>2</sup> (T3)、300 kg/hm<sup>2</sup> (T4),重复 3 次。采用喷施的方式,各处理喷施浓度均为 1%,其他处理均与 T4 保持相同的喷施用水量,喷施时间为 2020 年 7 月 28 日。试验小区面积为 30 m<sup>2</sup> (5 m×6 m),小区间用土埂分隔开。饲草燕麦在 2020 年 6 月 1 日播种,于 2020 年 10 月 9 日收获。所有处理饲草燕麦氮肥施用量为 225 kg/hm<sup>2</sup>,不施磷肥。氮肥基施 40%,追施 60%,8 月 5 日结合灌水追肥 1 次,占总量 25%,8 月 31 日追肥 1 次,占总量 25%,9 月 20 日追肥 1 次,占总量 10%。各小区为独立的滴灌单元,每两行铺设 1 根滴灌带,滴灌带铺设在窄行内,试验区四周种植保护行,由潜水泵将水通过 75 mm PE 管抽送到试验小区,与 75 mm PE 管接口处安装水表准确计量,3 mm PE 管做支管连接到 16 mm 毛管,施肥溶于水用水泵施入。灌水总量 160 m<sup>3</sup>,滴灌分 8 次。

分别于饲草燕麦拔节期(08-17)和收获期(10-08),采用仪器 TDR350 测定 20 cm 土层处的土壤含水量、土壤温度和电导率。收获饲草燕麦的同时,利用环刀法测量土壤容重,在每个小区采用对角线法取 3 个点,进行取样并采集 0~10 cm、10~20 cm 土层土样,带回实验室测定土壤养分含量。采用 NaOH 熔融-火焰光度计法测定全钾含

量,中性 1 mol/L 乙酸铵溶液浸提,火焰光度计测定速效钾含量,碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法进行测量土壤有效磷含量,半微量凯氏定氮法测定全氮含量,采用碱解-扩散法测定水解性氮含量,AA3 流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定全磷含量,重铬酸钾容量法测定有机质含量,梅特勒-托利多 pH 计将水土比按照 V(水):V(土)=5:1 体积比充分震荡静置后测 pH,以上具体方法见文献<sup>[7]</sup>。积温计算具体方法参照肖静等<sup>[8]</sup>。每个小区随机取 10 株带回实验室测产,作物株高和产量测定方法参照赵玉花<sup>[9]</sup>。

## 1.4 数据处理

数据处理采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 21.0,对数据进行统计分析,对土壤含水量、温度、电导率、容重、各项养分指标和产量数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、独立样本 T 检验和 Duncan 多重比较;利用 Origin 2018C 对处理后的数据进行拟合及绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 喷施 CMC-K 对土壤特性的影响

不同 CMC-K 处理的土壤含水量、温度、电导率以及容重变化见表 1。可知:8 月 17 日(拔节期),CK 处理土壤含水量为 19.89%,T1、T2、T3、T4 处理相较于 CK 处理分别提高了 39.78%、68.27%、98.16%和 116.8%,各处理与 CK 处理表现出显著性差异( $P<0.05$ ),不同处理之间也达到了显著差异( $P<0.05$ );10 月 9 日(成熟期),CK 处理土壤含水量为 47.72%,T1、T2、T3、T4 处理相较于 CK 处理土壤含水量分别提高了 2.42%、6.80%和 2.75%、2.03%,各处理与 CK 处理之间无显著性差异( $P>0.05$ )。该研究结果表明,喷施 CMC-K 具有土壤水分保持功效,且随着喷施量的增加,土壤含水量显著增加。在饲草燕麦收获期,处理与对照以及各处理之间的土壤含水量无显著差异,主要原因可能是从 9 月中旬开始,田间封行抑制了土壤蒸发,减少了土壤水分损失,导致不同处理的土壤含水量差异性降低。

8 月 17 日,CK 处理土壤温度为 26.02℃,T1、T2、T3、T4 处理较 CK 处理土壤温度分别提高了 0.46、0.48、0.46、0.50℃,四组处理均与 CK 有显著性差异( $P<0.05$ );10 月 9 日,CK 处理的土壤温度为 18.57℃,T1、T2、T3、T4 处理较 CK 处理土壤

温度分别提高了 0.64、0.97、1.04 和 0.44 °C,各处理与 CK 处理也表现出显著性差异( $P<0.05$ ),其中 T2、T3 处理显著提高了土壤温度, T4 处理提高不多。喷施 CMC-K 可以形成土壤固化层,类似土膜;由于土膜降低了土壤的透气性,因而产生保温效果,增加土壤温度。对四组不同处理土壤积温的估算结果表明, T1、T2、T3 和 T4 处理可以分别为饲草燕麦的整个生育期贡献积温 50.60~70.40、52.80~106.70、50.60~114.40、48.40~55.00 °C。

10月9日测得 CK 处理的土壤电导率为 0.46 mS/cm, T1 处理比 CK 处理降低了 4.57%,而

T2、T3、T4 处理比 CK 处理分别提高了 32.93%、23.32%、0.48%,其中 T2、T3 处理与 CK 处理差异达显著水平( $P<0.05$ ), T1、T4 处理与 CK 处理则无显著性差异( $P>0.05$ ),并且从 T2 处理开始,土壤电导率随着喷施量的增加而降低。

在饲草燕麦收获期测量土壤容重,结果见表 1。可知:喷施 CMC-K 对土壤容重影响较小,CK 处理的土壤容重为 1.68 g/cm<sup>3</sup>, T1、T2、T3、T4 处理的土壤容重分别为 1.85、1.79、1.92 和 1.82 g/cm<sup>3</sup>; T3 处理较 CK 处理土壤容重增加了 14.12%,与 CK 处理表现出显著性差异( $P<0.05$ )。

表 1 喷施 CMC-K 对宁夏引黄灌区土壤物理特性的影响

Table 1 Effects of CMC-K spraying on soil physical properties in Ningxia Yellow River Irrigation Area

处理 Treatment	土壤含水量/% Soil water content		土壤温度/°C Soil temperature		土壤电导率/ (mS/cm) Soil electrical conductivity	土壤容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) Soil bulk density
	08-17	10-09	08-17	10-09		
	CK	19.89±1.09 e	47.72±1.18 a	26.02±0.02 b		
T1	27.80±1.35 d	48.88±0.65 a	26.48±0.03 a	19.20±0.03 b	0.441±0.044 b	1.85±0.04 ab
T2	33.47±1.41 c	50.97±1.39 a	26.50±0.02 a	19.54±0.03 a	0.614±0.095 a	1.79±0.05 b
T3	39.41±1.23 b	49.03±1.19 a	26.48±0.01 a	19.61±0.07 a	0.570±0.035 a	1.91±0.06 a
T4	43.11±1.15 a	48.69±0.74 a	26.52±0.01 a	19.01±0.01 c	0.464±0.039 b	1.82±0.06 ab

注:表中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

## 2.2 喷施 CMC-K 对土壤化学性质的影响

### 2.2.1 CMC-K 对土壤全钾和速效钾含量的影响

不同处理的土壤全钾含量和速效钾含量变化如图 1 所示。由图 1(a)可知:0~10 cm 土层中,各处理全钾含量较 CK 处理分别增加 28.31%、39.62%、47.71%和 63.07%;在 10~20 cm 土层中,各处理全钾含量较 CK 处理分别增加 12.30%、41.25%、60.78%和 75.05%,可以看到喷施 CMC-K 在两个土层中均表现出显著性差异( $P<0.05$ ),由图 1(b)可知:施用 CMC-K 对 0~20 cm 土层速效钾含量的影响显著增加。其中,在 0~10 cm 土层中,各处理速效钾含量分别增加 34.72%、56.36%、79.89%和 95.45%;在 10~20 cm 土层中,各处理速效钾含量分别增加 25.65%、54.61%和 96.29%、125.37%。CMC-K 的不同施用量对土壤速效钾含量影响具有显著性差异( $P<0.05$ )。全钾含量

和速效钾含量随着 CMC-K 的喷施量增加而增加,由于 CMC-K 自身带有钾元素的化学特性,可以为作物提供钾元素,因此,显著增加了土壤全钾和速效钾含量。

### 2.2.2 喷施 CMC-K 对土壤有效磷、全氮、水解性氮的影响

在作物成熟期(10月9日)取样,调查不同处理对土壤有效磷、全氮、水解性氮的影响,结果见图 2。由图 2(a)可知:在 0~10 cm 土层中,CK 处理的土壤有效磷含量为 17.37 mg/kg, T1、T2、T3、T4 处理土壤有效磷含量分别为 23.33、19.50、20.03 和 20.61 mg/kg,各处理与 CK 处理无显著性差异( $P>0.05$ )。在 10~20 cm 土层中,CK 处理的土壤有效磷含量为 14.67 mg/kg, T1、T2、T3、T4 处理土壤有效磷含量分别为 12.87、14.67、15.97 和 14.00 mg/kg,各处理与 CK 处理无显著性差异( $P>0.05$ )。0~10 cm



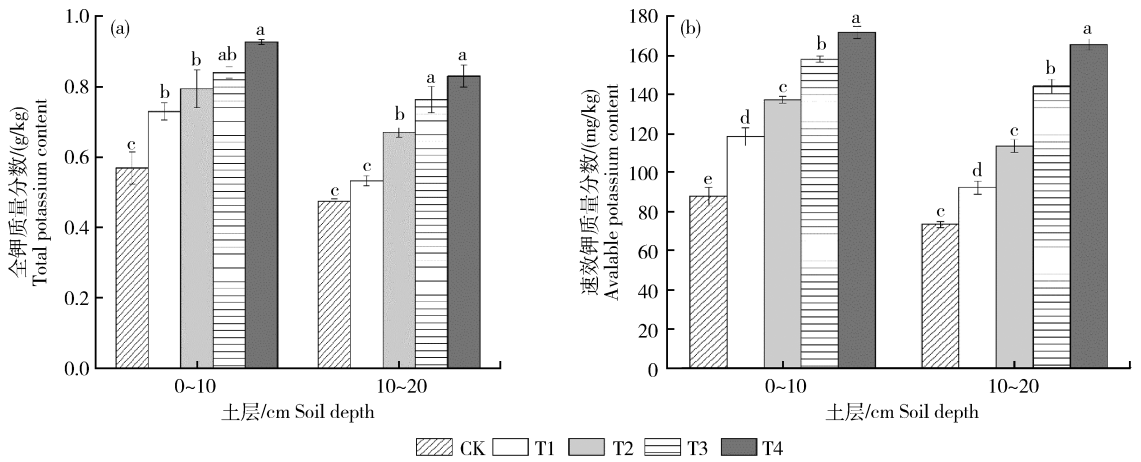


图 1 喷施 CMC-K 对宁夏引黄灌区土壤全钾和速效钾的影响

Fig. 1 Effects of CMC-K spraying on soil total potassium and available potassium in Ningxia Yellow River Irrigation Area

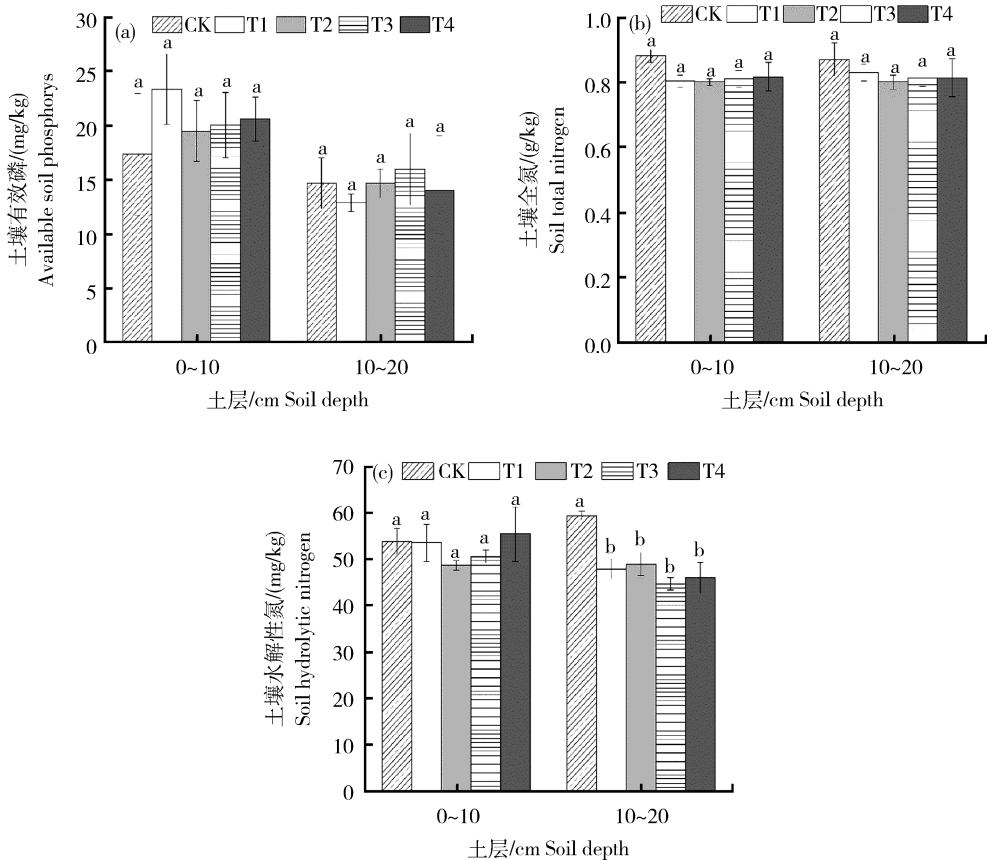


图 2 喷施 CMC-K 对宁夏引黄灌区土壤有效磷、全氮、水解性氮的影响

Fig. 2 Effects of CMC-K spraying on soil available P, total N and hydrolytic N in Ningxia Yellow River Irrigation Area.

土壤有效磷含量明显高于 10~20 cm 土层的有效磷含量。正是由于 CMC-K 具有吸附性,能够固持土壤有效磷,减少土壤淋溶的结果。

土壤中全氮调查结果见图 2(b)。可知:在 0~10 cm 土层中,CK 处理的土壤全氮含量为 0.88 g/kg, T1、T2、T3、T4 处理土壤全氮含量分别为 0.81、

0.80、0.81和0.81 g/kg,各处理与CK处理表现出无显著性差异( $P>0.05$ );在10~20 cm土层中,CK处理的土壤全氮含量为0.87 g/kg,T1、T2、T3、T4处理土壤全氮含量分别为0.83、0.80、0.81和0.81 g/kg,各处理与CK处理之间无显著性差异( $P>0.05$ )。由于CMC-K主要对阳离子态氮有固持作用,在全氮中包含各种离子态氮,因此,在不同层土壤中,各处理全氮含量与CK处理无显著性差异( $P>0.05$ )。

不同处理对土壤水解性氮的影响如图2(c)所示:在0~10 cm土层中,CK处理的土壤水解性氮含量为53.83 mg/kg,T1、T2、T3、T4处理土壤水解性氮含量分别为53.50、48.67、50.60和55.37 mg/kg,各处理与CK处理表现出无显著性差异( $P>0.05$ )。在10~20 cm土层中,CK处理的土壤水解性氮含量为59.40 mg/kg,T1、T2、T3、T4处理土壤水解性氮含量分别为47.87、48.93、44.70和45.97 mg/kg,T1、T2、T3、T4处理相较于CK处理土壤水解性氮含量分别减少了19.42%、17.62%、24.75%和22.62%,与CK处理表现出显著性差异( $P<0.05$ )。

### 2.3 喷施CMC-K对饲草燕麦株高的影响

调查喷施不同浓度CMC-K对饲草燕麦株高的影响,结果见图3。可知:在作物成熟期(10月9日)进行田间取样CK处理的作物株高为103.44 cm,T1、T2、T3、T4处理作物株高分别为124.00、111.78、121.78、113.78 cm,其中T1、T2、T3、T4处理将作物株高分别提高了19.88%、8.06%、17.73%和10.00%,T1、T3、T4处理相较于CK处理具有显著性差异( $P<0.05$ ),T2处理与CK处理无显著性差异( $P>0.05$ )。T2处理无显著差异,主要是因为是在田间测定作物株高时存在取样误差。

### 2.4 喷施CMC-K对饲草燕麦产量的影响

喷施不同浓度CMC-K对饲草燕麦产量的影响结果见图4。可知:CK处理的产量(干重)为1847.67 kg/hm<sup>2</sup>,T1、T2、T3、T4处理的产量分别为2194.85、2396.20、2563.73、2847.52 kg/hm<sup>2</sup>,各处理相较于CK处理分别将产量提高了18.80%、29.69%、38.75%、54.11%,四组处理与CK处理表现出显著性差异( $P<0.05$ )。随着喷施量的增加,饲草燕麦的产量也随之增加。由于CMC-K提高了土壤电导率、土壤温度,施入土壤还可以形成一层薄的土膜,相较于CK处理,为植物生长提供了适宜的

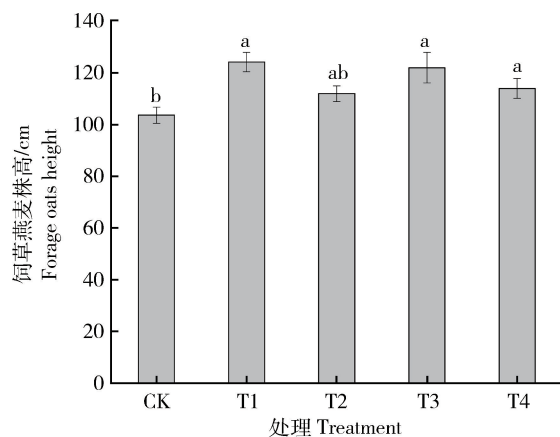


图3 不同喷施量的CMC-K对饲草燕麦株高的影响

Fig. 3 Effect of different amounts of CMC-K on the plant height of forage oat

环境和养分,因而在产量方面表现较好。CMC-K成本约2~3万元/t,T4处理的产量达到最高,但由于CMC-K用量太大,投入成本增加;同时,T1处理虽然用量小,但效果不太理想,因此,选择中间喷施量100 kg/hm<sup>2</sup>为推荐施用量。

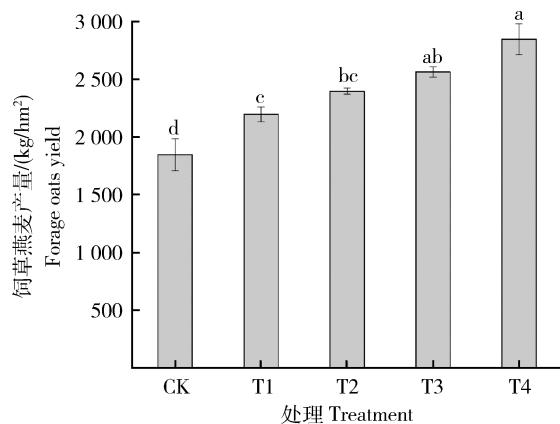


图4 喷施CMC-K对饲草燕麦产量的影响

Fig. 4 Effect of spraying CMC-K on forage oat yield

### 2.5 CMC-K施用量与土壤理化性质及饲草燕麦产量的相关性

CMC-K施用量与土壤理化性质及饲草燕麦产量的相关性分析的结果见表2。可知:CMC-K施用量与土壤含水量、饲草燕麦产量、土壤全钾含量和速效钾含量呈显著性正相关,表明喷施CMC-K可以显著影响宁夏引黄灌区的土壤含水量、全钾含量、速效钾含量以及作物产量,对增加引黄灌区养分和水分利用率有很好的作用,同时对作物产量也具有一定贡献。其中,土壤温度与饲草燕麦产量呈现显著

表 2 CMC-K 施用量与土壤理化性质及饲草燕麦产量的 Spearman 相关性

Table 2 Spearman correlation between CMC-K application amount and soil physical and chemical properties and forage oat yield

指标 Index	CMC-K 施用量 CMC-K Application amount										
	全钾 TK	速效钾 AK	有效磷 AP	全氮 TN	水解性氮 AN	硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	土壤含水量 SWC	土壤温度 ST	土壤容重 SBD	燕麦产量 Yield
全钾 TK	1										
速效钾 AK	0.920 **	1									
有效磷 AP	0.195	0.164	1								
全氮 TN	-0.305	-0.348	0.350	1							
水解性氮 AN	0.059	0.073	0.049	0.104	1						
硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.073	-0.082	0.205	0.474	0.183	1					
铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.206	0.122	-0.005	0.380	-0.025	0.608 *	1				
土壤含水量 SWC	0.410	0.441	0.151	-0.280	-0.137	0.005	0.196	1			
土壤温度 ST	0.411	0.332	0.115	-0.427	-0.395	-0.263	0.083	0.414	1		
土壤容重 SBD	0.436	0.439	0.170	-0.451	-0.206	0.032	0.004	0.411	0.463	1	
燕麦产量 Yield	0.676 **	0.612	0.152	-0.386	-0.343	-0.273	0.057	0.634 *	0.879 **	0.496	1

注：\*\*表示显著性水平达到 0.01；\*表示显著性水平达到 0.05。

Note: \*\* means the correlation is significant at the 0.01 level, \* means the correlation is significant at the 0.05 level.

性正相关。

## 3 讨论

### 3.1 喷施 CMC-K 对土壤理化性状的影响

黄化刚等<sup>[10]</sup>研究表明不同土壤改良剂均能不同程度的影响土壤理化性质,提高土壤保肥能力进而增加土壤肥力。纤维素改性后具有吸水性,能够吸附自身质量几十到几百倍的水分,不同改性纤维素吸水倍率不同,其中在已研究的羧甲基改性纤维素材料中,CMC-K 吸水倍率较高<sup>[11]</sup>。研究发现,施用 CMC-NH<sub>4</sub> 对土壤水分产生明显影响,且随着 CMC-NH<sub>4</sub> 的施用量的增加,土壤含水量也随之增大<sup>[12]</sup>。本研究结果表明,试验处理在拔节期的土壤含水量较 CK 产生明显差异,且随着喷施量的增加,土壤含水量显著增加,表明喷施 CMC-K 具有土壤水分保持功效,与上述研究结果一致。邢磊<sup>[2]</sup>研究发现施用 5 种改性纤维素材料后,处理组的土壤电导率高于对照组,说明改性纤维素材料能够影响土壤电导率;杨逵<sup>[13]</sup>在土壤中加入的保水剂中含有交换能力较强的羧基,可以和土壤中吸附的离子进行交换,从而会提高土壤浸出液电导率。本研究也发现,T2、T3 处理电导率比 CK 处理分别提高了 32.93%、23.32%,差异达显著水平,与上述研究一致。由于 CMC-K 具有吸附性,能够固持土壤养分离子,使得电导率提高,T1 处理可能是施用量较低,与对照表现出无明显差异,而 T4 处理表现出无显著性差异,可能是试验误差所致。微生物土壤改良剂处理的土壤耕层温度均高于对照,可以提高土壤温度<sup>[14]</sup>。本研究发现喷施 CMC-K 的各处理较 CK 处理土壤温度分别日均提高了 0.64、0.97、1.04、0.44 °C,表现出显著性差异,与上述研究一致,T2、T3 处理表现最优。张微<sup>[15]</sup>和周磊<sup>[16]</sup>研究表明,土壤改良剂可以降低土壤容重。本研究中 T1、T2、T4 处理对土壤容重均无显著性影响,与上述研究不同,T3 处理可能是取样误差所导致。

### 3.2 喷施 CMC-K 对土壤养分的影响

土壤钾含量与植物钾含量密切相关,缺钾易导致植物叶片变黄、组织坏死,影响植物的光合作用和呼吸作用,降低氮肥、磷肥的利用效率,显著抑制了作物的生长和产量。土壤钾元素含量降低已经成为制约农业发展的主要原因之一<sup>[17-19]</sup>。CMC-K 在吸水的同时能够吸附水体中离子,且吸附效果较好,改性纤维素吸附能力较强<sup>[20]</sup>。邢磊<sup>[2]</sup>研究发现,在吸

附过程中改性纤维素材料对磷酸根吸附效率均在 73.1% 以上。本研究中喷施 CMC-K 可以显著提高土壤全钾含量和速效钾含量,其中在全钾含量方面,四组处理均显著提高全钾含量,可以供给作物生长所需的钾元素;土壤中速效磷和速效钾是作物直接利用的营养元素<sup>[21]</sup>,在速效钾含量方面,喷施 CMC-K 可以显著提高 2 个土层的速效钾含量,可以为植物供给更易吸收利用的养分,有助于作物更好的生长和发育。文星等<sup>[22]</sup>的研究表明,以生石灰、白云石粉和海泡石等为主要成分的化学改良剂,可以降低土壤中有效磷的含量。本研究发现,喷施 CMC-K 对土壤有效磷含量无显著性影响,与上述研究不一致,可能是喷施量有限,导致不同处理在同一土层的有效磷含量无显著性差异。邢磊<sup>[2]</sup>研究表明,在田间施用条件下,改性纤维素对土壤全氮、全磷含量无显著性影响。本试验发现,喷施 CMC-K 也对土壤全氮含量无显著性影响,与上述研究一致。水解性氮是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺以及易水解性蛋白质的总和,是土壤氮素的主要组成部分,与土壤全氮相比,更能反映土壤近期氮素的供应状况<sup>[23]</sup>。普遍的观点是土壤胶体带负电荷,我国目前施氮肥主要是铵态氮肥,所以土壤会对施入的氮肥形成的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 有吸附作用,土壤主要通过静电引力吸附 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,且吸附量的多少取决于土壤胶体的数量和所带负电荷的数量<sup>[24]</sup>;反之,对于硝态氮来说 CMC-K 对其没有吸附作用。本研究通过测量 0~10、10~20 cm 土层的水解性氮含量,在 0~10 cm 处可以看到水解性氮含量各处理与 CK 处理无显著性差异,而在 10~20 cm 处水解性氮含量四组处理与 CK 处理表现出显著性差异且相较于 CK 处理水解性氮含量减少了。由于喷施 CMC-K 在土壤中形成土壤胶体,会吸附土壤中的阳离子态氮,CMC-K 将土壤中的水解性氮吸附到了上层土壤,由此可以看到 CMC-K 可以对水解性氮起到固持的作用,减少了水解性氮的淋溶。

### 3.3 喷施 CMC-K 对饲草燕麦产量的影响

植物主要通过根系吸收土壤中的养分,土壤中的养分、水分含量直接影响作物根系的吸收和生长,而土壤改良剂通过对土壤性质的影响进而影响作物的生长发育。有研究表明,土壤改良剂可显著促进土壤团粒的形成,改善土壤结构,提高土壤肥力,增加土壤保水、保肥性能,能提高作物产量<sup>[25-27]</sup>。康爱民等<sup>[28]</sup>研究表明,改良剂能促进植株分蘖,提高黑



麦草地上部生物量。刘莉萍等<sup>[29]</sup>研究表明,单施和混施改良剂均能不同程度地提高株高和茎粗。李志洪等<sup>[30]</sup>研究表明,土壤改良剂能增加叶绿素含量,提高光合作用,增加株高、地茎和枝条萌发力。本试验发现,喷施 CMC-K 可以显著提高饲草燕麦的株高,T1、T3 处理表现最优,可以将株高分别提高 20.56、18.34 cm;各处理相较于 CK 处理在产量方面表现出显著差异,可以将产量提高(8.80%~54.11%)。

## 4 结论

在宁夏引黄灌区喷施 CMC-K,提高土壤水分 6.80%~68.27%,为饲草燕麦生育期贡献积温 52.80~106.70 °C,增加土壤全钾、速效钾含量,能够固持养分,使其聚集在上层土壤,减少养分的淋溶,可以改良土壤特性,促进土壤养分吸收利用,促进增产,提高饲草燕麦产量 18.80%~54.11%。因此,CMC-K 可以作为宁夏引黄灌区农田土壤改良剂,综合考虑其经济效益,推荐施用量为 100 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参考文献 References

[1] 陈筠. 纤维素纳米晶的炔基化修饰及其改性材料的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2015  
Chen Y. Study on the alkynyl modification of cellulose nanocrystals and its modified materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015 (in Chinese)

[2] 邢磊. 改性纤维素对黄土高原农田土壤及作物的影响研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2019  
Xing L. Research on the effects of modified cellulose on farmland soil and crops in the Loess Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 (in Chinese)

[3] Habibi Y, Lucia L A, Rojas O J. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2010, 110(6): 3479-3500

[4] 朱志明, 杨晓婉, 杜海东, 张战胜, 杨自建, 黄继兵. 宁夏引黄灌区种植制度的演变与发展[J]. 农业科学研究, 2019, 40(2): 39-45  
Zhu Z M, Yang X W, Du H D, Zhang Z S, Yang Z J, Huang J B. Evolution and development of tillage system in Ningxia irrigation area of Yellow River diversion [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 40(2): 39-45 (in Chinese)

[5] 洪瑜, 李旭, 张慈娟, 王英, 王芳, 刘汝亮. 基于养分专家系统的侧深施肥技术对宁夏引黄灌区水稻产量与养分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 252-258  
Hong Y, Li X, Zhang C J, Wang Y, Wang F, Liu R L. Effects of lateral depth fertilization technology based on

nutrient expert system on rice yield and nutrient utilization in Ningxia Yellow River Irrigation District [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 252-258 (in Chinese)

[6] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 李友宏, 赵天成, 陈晨. 长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 248-252, 261  
Hong Y, Wang F, Liu R L, Li Y H, Zhao T C, Chen C. Effects of long-term combined application of organic fertilizers on spring maize yield and nitrogen utilization in irrigated soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 248-252, 261 (in Chinese)

[7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000  
Bao S D. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)

[8] 肖静, 李楠, 姜会飞. 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J]. 气象研究与应用, 2010, 31(2): 64-67  
Xiao J, Li N, Jiang H F. Calculation method and stability of accumulated temperature during crop growth [J]. *Meteorological research and application*, 2010, 31(2): 64-67 (in Chinese)

[9] 赵玉花. 播期对山东冬小麦产量和抗倒性能的影响[J]. 农业工程技术, 2018, 38(5): 19-20  
Zhao Y H. Effects of sowing date on yield and lodging resistance of winter wheat in Shandong Province [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2018, 38(5): 19-20 (in Chinese)

[10] 黄化刚, 刘世碧, 班国军, 陈焱, 夏中文, 张庆, 王美艳, 徐胜祥, 孙维侠, 史学正, 曹志洪. 多孔改良剂对毕节烟区植烟土壤重金属铬镉铅的影响[J]. 土壤, 2019, 51(2): 346-351  
Huang H G, Liu S B, Ban G J, Chen Y, Xia Z W, Zhang Q, Wang M Y, Xu S X, Sun W X, Shi X Z, Cao Z H. Effects of porous modifiers on heavy metals chromium, cadmium and lead in tobacco-growing soil in Bijie tobacco area [J]. *Soil*, 2019, 51(2): 346-351 (in Chinese)

[11] 邢磊, 杨世琦. 改性纤维素的吸附性能及应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(3): 59-65  
Xing L, Yang S Q. Adsorption properties and application research progress of modified cellulose [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(3): 59-65 (in Chinese)

[12] 杨世琦, 邢磊, 刘宏元, 王惟帅, 郭萍. 羧甲基纤维素铵对黄土高原新造耕地土壤性质的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2021(5): 2-8  
Yang S Q, Xing L, Liu H Y, Wang W S, Guo P. Effects of Ammonium Carboxymethyl Cellulose on Soil Properties of Newly Cultivated Land in the Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2021(5): 2-8 (in Chinese)

[13] 杨逵. 有机-无机复合保水剂的保水性能和对土壤理化性质的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2008  
Yang K. Water retention performance of organic-inorganic composite water retaining agent and its effect on soil physical and chemical properties [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural

- University, 2008 (in Chinese)
- [14] 李彰, 熊瑛, 吕强, 石秋环, 李友军. 微生物土壤改良剂对烟草生长及耕层环境的影响[J]. 河南农业科学, 2010(9): 56-60  
LI Z, XIONG Y, LU Q, SHI Q H, LI Y J. Effects of microbial soil amendments on tobacco growth and cultivated layer environment[J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2010(9): 56-60 (in Chinese)
- [15] 张微. 生物质土壤改良剂对风沙土改良效应及植物生长的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014  
ZHANG W. Effect of Biomass Soil Amendment on Aeolian Sandy Soil Improvement and Plant Growth[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2014 (in Chinese)
- [16] 周磊. 沙质土壤改良剂对沙地改良效果的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015  
Zhou L. Research on the effect of sandy soil amendment on sandy land improvement [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [17] Cakmak I. Potassium for better crop production and quality [J]. *Plant and Soil*, 2010, 335(1-2): 1-2
- [18] 李德忠, 吕岩, 朱明志, 贾维东, 孙艳芬, 谢佳贵. 钾肥运筹对春玉米农学效应和钾素利用的研究[J]. 吉林农业科学, 2013, 38(4): 25-27  
Li D Z, Lv Y, Zhu Z M, Jia W D, Sun Y F, Xie J G. Study on the agronomic effect of potassium fertilizer management on spring maize and potassium utilization[J]. *Jilin Agricultural Sciences*, 2013, 38(4): 25-27 (in Chinese)
- [19] 尹彩侠, 侯云鹏, 秦裕波, 孔丽丽, 于雷, 刘春光, 王秀芳, 张宽, 谢佳贵. 吉林省不同类型土壤玉米施用钾肥效应研究[J]. 吉林农业科学, 2010, 35(5): 22-24  
Ying C X, Hou Y P, Qin Y B, Kong L L, Yu L, Liu C G, Wang X F, Zhang K, Xie J G. Effects of potassium application on maize in different soil types in Jilin Province [J]. *Jilin Agricultural Sciences*, 2010, 35(5): 22-24 (in Chinese)
- [20] Dionisiou N S, Matsi T, Nikolaos D. Misopolinos. Phosphorus adsorption-desorption on a surfactant-modified natural zeolite: A laboratory study [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2013, 224(1): 1362
- [21] 花东文, 李娟, 曹婷婷. 微生物土壤改良剂对复配土养分及作物产量的影响[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, 4(9): 37-41  
Hua D W, Li J, Cao T T. Effects of microbial soil improver on nutrient and crop yield of mixed soil [J]. *Development of West China (Land Development Engineering Research)*, 2019, 4(9): 37-41 (in Chinese)
- [22] 文星. 几种土壤改良剂对酸性水稻土及红壤旱土的改良效果研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014  
Wen X. Study on the improvement effect of several soil amendments on acid paddy soil and red dry soil [D]. Changsha: Central South University, 2014 (in Chinese)
- [23] 吴文清, 黄少斌, 张瑞峰, 祝光富. 一种新型改性吸附剂对水中痕量磷的吸附特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 1991-1998  
Wu W Q, Huang S B, Zhang R F, Zhu G F. Adsorption characteristics of trace phosphorus in water by a new modified adsorbent [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(11): 1991-1998 (in Chinese)
- [24] 李志安, 林永标, 沈承德, 孙彦敏, 陈庆祥. 华南不同人工林土壤铵吸附特征及其吸附动力学研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 383-389  
Li Z A, Lin Y B, Shen C D, Sun Y M, Chen Q X. Study on ammonium adsorption characteristics and adsorption kinetics of different plantation soils in South China [J]. *Journal of soil*, 2001, 38(3): 383-389 (in Chinese)
- [25] 李莉, 张鑫, 施建新, 代晓华. 不同改良剂对作物生长发育及产量的影响[J]. 农业科学, 2017, 7(3): 179-187  
Li L, Zhang X, Shi J X, Dai X H. The effects of different amendments on crop growth and yield [J]. *Agricultural Sciences*, 2017, 7(3): 179-187 (in Chinese)
- [26] 高永恒. 土壤改良剂对多年生黑麦草生长特性和土壤理化性质的影响研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2004  
Gao Y H. The effect of soil amendments on the growth characteristics and soil physical and chemical properties of perennial ryegrass [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2004 (in Chinese)
- [27] 黄耀蓉, 王强锋, 朱彭玲, 张亮, 夏中梅, 侯勇. 土壤改良剂对酸性土壤改良的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4): 1637-1640  
Huang Y R, Wang Q F, Zhu P L, Zhang L, Xia Z M, Hou Y. Effects of soil amendments on acid soil improvement [J]. *Southwest Agricultural Journal*, 2014, 27(4): 1637-1640 (in Chinese)
- [28] 康爱民, 高永恒, 孙吉雄. 土壤改良剂对多年生黑麦草生长的影响[J]. 草原与草坪, 2006(2): 45-48  
Kang A M, Gao Y H, Sun J X. Effects of soil amendments on the growth of perennial ryegrass [J]. *Grassland and Lawn*, 2006(2): 45-48 (in Chinese)
- [29] 刘莉萍, 刘兆普, 隆小华. 2种盐土改良剂对苏北滨海盐碱土壤盐分及植物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 127-131, 153  
Liu L P, Liu Z P, Long X H. Effects of two saline soil amendments on the salt content and plant growth of coastal saline-alkali soils in northern Jiangsu [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 127-131, 153 (in Chinese)
- [30] 李志洪, 王淑华. 土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响[J]. 土壤通报, 2000, 31(2): 55-57, 96  
Li Z H, Wang S H. Effects of soil bulk density on soil physical properties and wheat growth [J]. *Soil Bulletin*, 2000, 31(2): 55-57, 96 (in Chinese)