

## 红壤养分扩容与离子平衡调理对玉米生长的影响<sup>①</sup>

陈硕<sup>1</sup>, 杨梦圆<sup>1</sup>, 苏纪康<sup>1</sup>, 恽文荣<sup>2</sup>, 刘建刚<sup>2</sup>, 赵耕毛<sup>1\*</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 常州市武进区水利局, 江苏常州 213161)

**摘要:** 本研究针对红壤养分库容小、盐基饱和度低、养分不平衡等问题, 以钙基膨润土、风化褐煤、有机肥、七水合硫酸镁、钙镁磷肥、硫酸钾等材料, 布置土壤养分库容扩容和土壤阳离子平衡调理试验, 研究上述物料对土壤阳离子交换量(CEC)和阳离子平衡的影响及玉米生长效应。结果表明, 钙基膨润土、风化褐煤、有机肥均能提高土壤 CEC, 膨润土+风化褐煤+有机肥组合处理(BWO)的 CEC 达到了 8.70 cmol/kg, 较空白对照处理(CK)显著提高 72.96%( $P<0.05$ )。在土壤养分扩容的基础上, 阳离子平衡调理处理(BWO1, BWO 处理基础上+钙镁磷肥+七水合硫酸镁+硫酸钾)显著促进了玉米地上部生长, 其株高、茎粗、生物量等较 CK 分别增加 55.5%、80.0%、152.7%( $P<0.05$ ); 同时也促进了玉米根系生长发育, 表现为总根长、总根体积、根表面积、平均根系直径、根尖数及分支数显著增加( $P<0.05$ ), 较 CK 分别增长 147.0%、425.0%、234.3%、50.0%、101.6%、134.3%。综上所述, 钙基膨润土、风化褐煤、有机肥、七水合硫酸镁、钙镁磷肥、硫酸钾等材料可用于红壤养分扩容及阳离子平衡调理, 改善土壤养分平衡状况, 从而提高玉米的养分利用效率, 促进玉米生长发育。

**关键词:** 土壤改良; 土壤阳离子交换量; 土壤扩容; 土壤盐基离子平衡

**中图分类号:** S156.6 **文献标志码:** A

### Effects of Nutrient Capacity Expansion and Ionic Balance Regulation in Red Soil on Maize Growth

CHEN Shuo<sup>1</sup>, YANG Mengyuan<sup>1</sup>, SU Jikang<sup>1</sup>, YUN Wenrong<sup>2</sup>, LIU Jiangang<sup>2</sup>, ZHAO Gengmao<sup>1\*</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Wujin District Water Resources Bureau of Changzhou Municipal, Changzhou, Jiangsu 213161, China)

**Abstract:** This study addressed the issues of low nutrient storage capacity, low base saturation, and nutrient imbalance in red soil. Using materials including calcium-based bentonite, weathered lignite, organic fertilizer, magnesium sulfate heptahydrate, calcium magnesium phosphate fertilizer, and potassium sulfate, an experiment on soil storage capacity expansion and soil cation balance regulation was conducted to investigate the effects of the above materials on soil cation exchange capacity (CEC), cation balance, and maize growth. Results showed that, calcium-based bentonite, weathered lignite, and organic fertilizer all enhanced soil CEC. The combined treatment of bentonite + weathered lignite + organic fertilizer (BWO) achieved a CEC of 8.70 cmol/kg, increased by 72.96% compared to the control (CK) ( $P<0.05$ ). Based on soil nutrient capacity improvement, the cation balance regulation treatment (BWO1, BWO+magnesium sulfate heptahydrate+calcium magnesium phosphate fertilizer+potassium sulfate) significantly promoted maize above-ground growth, with plant height, stem diameter, and biomass increased by 55.5%, 80.0% and 152.7%, respectively compared to CK ( $P<0.05$ ). It also enhanced root system development, demonstrating significant increases in total root length (147.0%), total root volume (425.0%), root surface area (234.3%), average root diameter (50.0%), root tip number (101.6%), and branch number (134.3%) compared to CK ( $P<0.05$ ). The findings indicated that these materials can effectively improve the nutrient storage capacity and cation balance of red soil, thereby enhancing maize nutrient use efficiency and overall growth development.

**Key words:** Soil improvement; Soil cation exchange capacity; Soil capacity increment; Soil base ions balance

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900702, 2020YFD0900703)和江苏省水利工程项目(CZWJ-QY-2024-LYYJ)资助。

\* 通信作者(seawater@njau.edu.cn)

作者简介: 陈硕(2000—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与平衡施肥方面研究。E-mail: 2022103023@stu.njau.edu.cn

红壤是指我国南部热带、亚热带地区分布的红色或黄色土壤,其主要特征为缺少碱土金属、盐基高度不饱和、富含铝铁氧化物、土壤呈酸性显红色<sup>[1]</sup>。由于我国南方高温多雨,土壤风化淋溶强烈,土壤有机质含量极低,导致土壤养分贫瘠,土壤肥力及生产力降低等问题日益严重<sup>[2]</sup>。土壤阳离子交换量(Cation exchange capacity, CEC)代表每千克土壤能吸附的阳离子电荷的厘摩尔数<sup>[3]</sup>,它表征土壤胶体吸附、保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力<sup>[4-5]</sup>。土壤盐基饱和度也常用来表征土壤颗粒吸附盐基离子的能力,通常用百分数表示。适宜作物生长的土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  的量占交换性盐基总量的 60%~80%,其他阳离子位点应被  $\text{NH}_4^{+}$  和  $\text{H}^{+}$  占据,且考虑三者间的平衡,交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  的比例为 5 : 2 : 1。在此条件下,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  三者间的拮抗作用最小,植物根系吸收养分能力最佳<sup>[6]</sup>。为了改善土壤结构、提升土壤保肥能力和提高作物生产力,增加土壤库容和平衡  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  等交换性阳离子,成为改良红壤的必要措施之一。

土壤改良剂能够改善土壤理化性质与生物特性,恢复和供给土壤养分,保证作物高产优产,提高土壤酶活性以及修复土壤<sup>[7]</sup>。膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的矿物土壤改良剂,具有良好的黏结性、吸附性、阳离子交换性能,在农业、工业及环境保护方面具有广泛应用<sup>[8]</sup>。一般土壤阳离子交换量为 5~30 cmol/kg,膨润土的阳离子交换量为 50~90 cmol/kg<sup>[9]</sup>,使用膨润土作为土壤改良剂能有效提高红壤保水保肥能力。褐煤富含游离腐殖酸,不仅具有丰富的孔隙结构,同时还具有大量活性羟基和羧基官能团,能够交换土壤中的金属离子,施用褐煤可以改良土壤,促进植物生长<sup>[10-11]</sup>。范庆锋

等<sup>[12]</sup>发现,土壤有机质与阳离子交换量呈显著正相关,有机质的分解使有机作用增强,形成更多有机无机复合体从而增加土壤交换性位点,提高土壤阳离子交换量。我国红壤地区,除了土壤养分库容小之外,  $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{K}$  等养分失衡成为制约地力发挥和作物产能提升的关键因素。当前,石灰类等传统酸性土壤改良剂的大量施用会导致土壤环境恶化等问题,导致土壤肥力下降<sup>[13]</sup>。人们对于土壤养分平衡仍认识不清,平衡营养对于缓解离子拮抗以及对作物健康生长的影响研究仍较为匮乏。本文着重研究南方红壤养分库容增容和交换性阳离子平衡调理方法,改善南方土壤养分库容较低的现状,补充土壤养分,从而促进玉米健康生长,为红壤地区土壤改良和作物高产高效提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试作物品种为长江玉 6 号,为中熟半紧凑型玉米品种,由南京市金盛达子公司提供。供试土壤采自湖南永州市,该市年平均气温为 19.6 °C,属于亚热带季风气候,年平均降水量约 1 400 mm,土壤类型为湖南酸性红壤,基本理化性质见表 1。土壤改良物料分别为钙基膨润土、风化褐煤、有机肥,其中钙基膨润土由鑫铖矿产品公司提供,风化褐煤和有机肥由青岛斯蒂文农业科技有限公司提供,土壤改良剂及有机肥用量均按照酸性土改良标准施用。土壤阳离子平衡调理使用钙镁磷肥( $\text{CaO}$  含量为 25%、 $\text{MgO}$  含量为 8%)、七水合硫酸镁( $\text{MgO}$  含量为 16.3%)、硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$  含量为 54.0%),钙镁磷肥由荆门市高园磷肥有限公司提供,七水合硫酸镁、硫酸钾来自南京农业大学海涂工程研究中心实验室。

表 1 供试土壤理化性质  
Table 1 Physicochemical properties of tested soil

土壤深度 (cm)	pH	电导率 (mS/cm)	有机质 (g/kg)	阳离子交换量 (cmol/kg)	盐基饱和度 (%)	交换性钙镁钾 (cmol/kg)
0~20	5.39	0.50	31.15	5.10	60.1	3.06

### 1.2 试验设计

试验在南京农业大学资源与环境科学学院温室进行。于 2023 年 4 月 8 日至 5 月 9 日布置土壤增容试验;2023 年 7 月 30 日至 9 月 4 日,在增容试验基础上,布置土壤阳离子平衡试验。温室控制温度为 20~35 °C,相对湿度 65%~75%,光照时间 12 h/d。土壤增容试验:试验设置 8 个处理,每个处理重复 3 次,分别为 CK(不施用改良物料)、B(钙基膨润土)、

W(风化褐煤)、O(有机肥)、BW(钙基膨润土+风化褐煤)、BO(钙基膨润土+有机肥)、WO(风化褐煤+有机肥)、BWO(钙基膨润土+风化褐煤+有机肥)。红壤自然风干后过 20 目筛,将土壤改良物料与土壤混合均匀后装入上直径 12 cm、下直径 8 cm、高 10 cm 的塑料盆钵中,每盆栽土 400 g,每隔 2 d 浇水一次,将水分保持在田间持水量的 80%。具体土壤增容试验处理见表 2。

表 2 土壤增容试验处理  
Table 2 Experimental treatments of soil capacity expansion

处理	土壤改良物料类型及用量
CK	无改良物料处理
B	钙基膨润土(1 500 kg/hm <sup>2</sup> )
W	风化褐煤(9 000 kg/hm <sup>2</sup> )
O	有机肥(15 t/hm <sup>2</sup> )
BW	钙基膨润土(1 500 kg/hm <sup>2</sup> )+风化褐煤(9 000 kg/hm <sup>2</sup> )
BO	钙基膨润土(1 500 kg/hm <sup>2</sup> )+有机肥(15 t/hm <sup>2</sup> )
WO	风化褐煤(9 000 kg/hm <sup>2</sup> )+有机肥(15 t/hm <sup>2</sup> )
BWO	钙基膨润土(1 500 kg/hm <sup>2</sup> )+风化褐煤(9 000 kg/hm <sup>2</sup> )+有机肥(15 t/hm <sup>2</sup> )

在土壤增容试验的基础上，布置土壤交换性阳离子平衡试验。由于土壤养分库容的提升，意味着土壤盐基饱和度的下降，需要进一步补充和平衡土壤交换性阳

离子。基于土壤阳离子平衡理论，土壤交换性阳离子的比例为  $Ca^{2+} : Mg^{2+} : K^+ = 5 : 2 : 1$ ，盐基饱和度维持在 80%，计算补充交换性阳离子的量。计算公式如下：

$$\text{补充 } Ca^{2+} \text{ 的量(mg/kg)} = \frac{[CEC \times 50\%(\text{cmol/kg}) - \text{土中交换性 } Ca^{2+}(\text{cmol/kg}) \times 1/2M_{Ca^{2+}}(\text{g/mol}) \times 1000]}{100} \quad (1)$$

$$\text{补充 } Mg^{2+} \text{ 的量(mg/kg)} = \frac{[CEC \times 20\%(\text{cmol/kg}) - \text{土中交换性 } Mg^{2+}(\text{cmol/kg}) \times 1/2M_{Mg^{2+}}(\text{g/mol}) \times 1000]}{100} \quad (2)$$

$$\text{补充 } K^+ \text{ 的量(mg/kg)} = \frac{[CEC \times 10\%(\text{cmol/kg}) - \text{土中交换性 } K^+(\text{cmol/kg}) \times M_{K^+}(\text{g/mol}) \times 1000]}{100} \quad (3)$$

式中： $M$  表示该元素的摩尔质量。

土壤交换性阳离子平衡试验设计 4 个处理，分别为 CK、CK1、BWO、BWO1，每处理重复 3 次，按照随机区组排列设计(表 3)。每盆钵称取 500 g 风干土壤，将钙镁磷肥、七水合硫酸镁、硫酸钾与土壤充

分混匀后装入盆钵，各处理按照相应配比量混合施用。七水合硫酸镁、硫酸钾使用分析纯化学试剂。玉米盆栽试验选取 10 粒形状大小相似的玉米种子播入盆中，在播种的第 7 天，间苗至每盆 2 株，每天保持水分至田间持水量 80%，相对湿度维持 65%。

表 3 土壤交换性阳离子平衡试验处理  
Table 3 Experimental treatments of soil exchangeable cation balance

处理	土壤改良物料类型及用量
CK	无改良物料施用处理
CK1	钙镁磷肥(0.382 0 g/kg)+七水合硫酸镁(0.434 4 g/kg)+硫酸钾(0.136 6 g/kg)
BWO	钙基膨润土(1 500 kg/hm <sup>2</sup> )+风化褐煤(9 000 kg/hm <sup>2</sup> )+有机肥(15 t/hm <sup>2</sup> )
BWO1	钙基膨润土(1 500 kg/hm <sup>2</sup> )+风化褐煤(9 000 kg/hm <sup>2</sup> )+有机肥(15 t/hm <sup>2</sup> )+钙镁磷肥(0.056 g/kg)+七水合硫酸镁(1.698 0 g/kg)+硫酸钾(0.574 6 g/kg)

### 1.3 土壤及植株样品采集与分析

取代表性土壤样品过 20 目及 100 目筛，用于基础土壤理化性质测定，参考《土壤农化分析》<sup>[14]</sup>。土壤 pH 采用电位法测定，土壤电导率使用电导仪测定，水土质量比均为 5 : 1；有机质采用重铬酸钾外加热法测定；土壤阳离子交换量采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定；交换性钙镁钾采用乙酸铵浸提-ICP-OES 法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；有效磷采用  $NH_4F-HCl$  法测定；速效钾采用乙酸铵浸提-ICP-OES 法测定。

植株生长至 30 d 后，分别收集玉米地上部和地下部，取一部分进行植株形态指标测定，另一部分在 105 °C 下烘干至恒重，磨成粉用于植株营养元素测定。植株高测定使用直尺测量从植株根茎分隔处至叶片顶端距离；茎粗使用游标卡尺测定。根系形态测定：各处理随机选取 6 株，使用 EpsonExpression12000XL 型根系扫描仪对各处理根系形态完好的 3 株根系进行扫描，使用 WinRHIZO 根系分析软件进行分析。将植株地上部与地下部分别称重测定生物量；植株  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消化法提取测定。

## 1.4 数据统计分析

采用 Excel 2016 进行数据整理与初步统计分析,应用 SPSS 26.0 软件对不同土壤改良剂处理进行单因素方差分析,并通过 Duncan 多重比较进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良剂对土壤理化性质的影响

由表 4 可知,钙基膨润土、风化褐煤、有机肥等单独施用或复配施用均能显著增加土壤养分。除施用有机肥(O 处理)外,不同改良剂的施用均不同程度显著提升土壤 pH( $P<0.05$ ),较 CK 处理提升 11.02%~20.50%。其中,添加钙基膨润土(B 处理)的 pH 最高,达到 6.23;添加膨润土+风化褐煤+有机肥(BWO 处理)的 pH 次之,达到 6.15,二者与其余处理均达到显著

差异( $P<0.05$ )。添加风化褐煤(W 处理)、风化褐煤+有机肥(WO 处理)、膨润土+风化褐煤(BW 处理)、膨润土+有机肥(BO 处理)土壤 pH 与 CK 处理均呈显著差异( $P<0.05$ ),但上述处理之间并无显著差异。只添加有机肥处理土壤 pH 与 CK 处理无显著差异,说明只添加有机肥并不能显著提升土壤 pH。由表 4 可知,施用土壤改良剂均能显著提升土壤电导率( $P<0.05$ ),各改良剂处理土壤电导率值为 0.80~0.92 mS/cm,比 CK 处理提高 62.96%~70.37%。其中,BO 和 BWO 处理与 W 和 O 处理间存在显著差异( $P<0.05$ ),B、BW、WO 处理与其余处理无显著差异。除 B 处理外,其余添加土壤改良剂处理土壤有机质含量均显著提升( $P<0.05$ ),较 CK 处理提高 6.97%~17.64%。其中,W、WO、BWO 处理与其余各处理均有显著差异( $P<0.05$ )。可见,添加风化褐煤能够短期补充土壤有机质。

表 4 不同改良剂对土壤理化性质的影响  
Table 4 Effects of different amendments on soil physicochemical properties

处理	pH	电导率(mS/cm)	有机质(g/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)	盐基饱和度(%)
CK	5.17±0.07c	0.54±0.05c	31.12±0.33c	5.03±0.31e	60.06
B	6.23±0.08a	0.88±0.08ab	31.00±0.45c	7.85±0.45bc	63.90
W	5.74±0.09b	0.80±0.04b	35.54±0.42a	6.79±0.54d	55.39
O	5.28±0.06c	0.81±0.09b	33.32±0.27b	6.41±0.10d	61.58
BW	5.91±0.09b	0.90±0.02ab	33.51±0.15b	7.48±0.09bc	68.57
BO	5.82±0.10b	0.92±0.04a	33.29±0.37b	7.99±0.03b	64.95
WO	5.86±0.05b	0.85±0.04ab	36.61±0.48a	7.31±0.43c	54.73
BWO	6.15±0.03a	0.92±0.02a	36.41±0.31a	8.70±0.37a	55.91

注: CK, 对照; B, 钙基膨润土; W, 风化褐煤; O, 有机肥; BW, 钙基膨润土+风化褐煤; BO, 钙基膨润土+有机肥; WO, 风化褐煤+有机肥; BWO, 钙基膨润土+风化褐煤+有机肥。表中数据为平均值±标准误差( $n=3$ ); 同列数据小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ ); 下表同。

### 2.2 不同改良剂对土壤养分库容的影响

本试验选择的土壤改良剂本身具有较大的阳离子交换量,经过土培试验 30 d 后,添加土壤改良剂处理阳离子交换量显著高于 CK( $P<0.05$ ),其值范围为 6.41~8.70 cmol/kg,较 CK 处理提高 27.44%~72.96%。其中,BWO 处理的阳离子交换量最高,为 8.70 cmol/kg,显著高于其他处理;其次是添加膨润土处理,B、BW、BO 处理的阳离子交换量显著高于 W、O 处理。因此可以看出,添加膨润土可以有效改善土壤 pH 及提升养分库容。一般认为,盐基饱和度是衡量土壤肥力的指标之一,盐基饱和度 $\geq 80\%$  的土壤为高肥力土壤。除 B、O、BW、BO 处理外,其他土壤改良剂处理降低了盐基饱和度,其中 BWO 处理(55.91%)相较于 CK 处理(60.06%)降低了 4%,原因可能是土壤改良剂施用提高了土壤阳离子交换量。

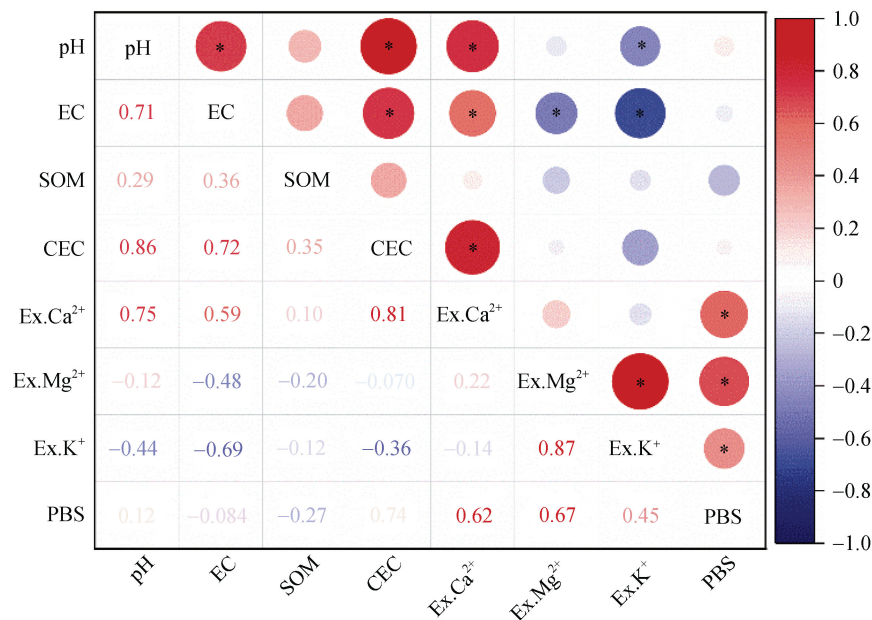
通过 Pearson 相关性分析研究土壤改良剂的施用对土壤阳离子交换量与 pH,电导率,有机质,交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$ ,盐基饱和度等指标的影响(图 1)。其中,土壤阳离子交换量与 pH、电导率、交换性  $\text{Ca}^{2+}$  呈显著正相关( $P<0.05$ ),相关系数分别为 0.86、0.72、0.81。土壤盐基饱和度与交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  呈显著正相关,相关系数分别为 0.62、0.67、0.45。施用土壤改良剂增加养分库容后,土壤的化学性质也会随之改变。土壤改良剂中携带一定量的交换性阳离子,施入土壤后不仅显著提高土壤阳离子交换量,土壤交换性阳离子也会随之增加。

### 2.3 土壤交换性阳离子平衡

土壤交换性阳离子平衡可显著增加土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^{+}$  含量以及土壤盐基饱和度(表 5)。其中,CK1 处理可交换性  $\text{Ca}^{2+}$  较 CK 显著增加了 0.22 cmol/kg,

可交换性  $Mg^{2+}$  显著增加了 0.27 cmol/kg( $P<0.05$ ), 可交换性  $K^+$  显著增加 0.11 cmol/kg; BWO1 处理可交换性  $Ca^{2+}$  相较于 BWO 显著增加了 0.25 cmol/kg, 可交换性  $Mg^{2+}$  显著增加了 1.14 cmol/kg, 可交换性  $K^+$  显著增加了 0.35 cmol/kg( $P<0.05$ )。CK1 的盐基饱和度相较于 CK 处理的 68.91% 增加至 80.44%, BWO1 处理盐基饱和度相较于 BWO 处理的 58.48% 增加至 76.89%。CK 处理的交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  的比例为 8.44 : 1.88 : 1, BWO 处理为 16.92 : 3.75 : 1, CK 处理与 BWO 处理的交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  的比例

严重失衡。而经过阳离子平衡后的土壤, CK1 交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  的比例为 7.00 : 2.07 : 1, BWO1 的比例为 7.20 : 3.50 : 1, 比未经土壤阳离子平衡的可交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  的比例更接近于 5 : 2 : 1。交换性阳离子平衡试验证明通过阳离子交换量后根据公式补充对应的矿物进行平衡阳离子可将土壤盐基饱和度调至 80%, 但土壤中交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  的比例只会趋近但不会完全达到 5 : 2 : 1, 这是因为土壤中添加的矿物并不能在短时间内将所有的  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  释放。



(EC: 土壤电导率; SOM: 土壤有机质含量; CEC: 阳离子交换容量; Ex.Ca<sup>2+</sup>: 交换性 Ca<sup>2+</sup>; Ex.Mg<sup>2+</sup>: 交换性 Mg<sup>2+</sup>; Ex.K<sup>+</sup>: 交换性 K<sup>+</sup>; PBS: 盐基饱和度。\*表示相关性达  $P<0.05$  显著水平)

图 1 土壤理化性质指标的相关性

Fig. 1 Correlations of soil physicochemical properties

表 5 交换性阳离子平衡对可交换性阳离子、盐基饱和度的影响  
Table 5 Effects of exchangeable cations balance on base ions and base saturation

处理	阳离子交换量 (cmol/kg)	交换性 $Ca^{2+}$ (cmol/kg)	交换性 $Mg^{2+}$ (cmol/kg)	交换性 $K^+$ (cmol/kg)	交换性 $Ca^{2+} : Mg^{2+} : K^+$	盐基饱和度 (%)
CK	5.31±0.44b	2.73±0.12d	0.61±0.08c	0.32±0.06c	8.44:1.88:1	68.91±2.62b
CK1	5.30±0.48b	2.95±0.11c	0.88±0.01b	0.43±0.03b	7.00:2.07:1	80.44±2.75a
BWO	8.64±0.50a	3.95±0.02b	0.87±0.05b	0.23±0.03c	16.92:3.75:1	58.48±0.45c
BWO1	8.82±0.59a	4.20±0.02a	2.01±0.01a	0.58±0.01a	7.20:3.50:1	76.89±0.11a

注: CK, 对照; CK1, 离子平衡调理后的对照; BWO, 钙基膨润土+风化褐煤+有机肥; BWO1, 离子平衡调理后+钙基膨润土+风化褐煤+有机肥。下同。

## 2.4 土壤阳离子平衡调理对玉米生长的影响

图 2 表明, 交换性阳离子平衡对 CK 与 BWO 处理的玉米株高、茎粗、地上部生物量均有显著影响。CK1 处理较于 CK 处理的玉米株高显著增加 8.4 cm, 相对增量为 16.3%(图 2A); 茎粗显著增加 0.63 mm,

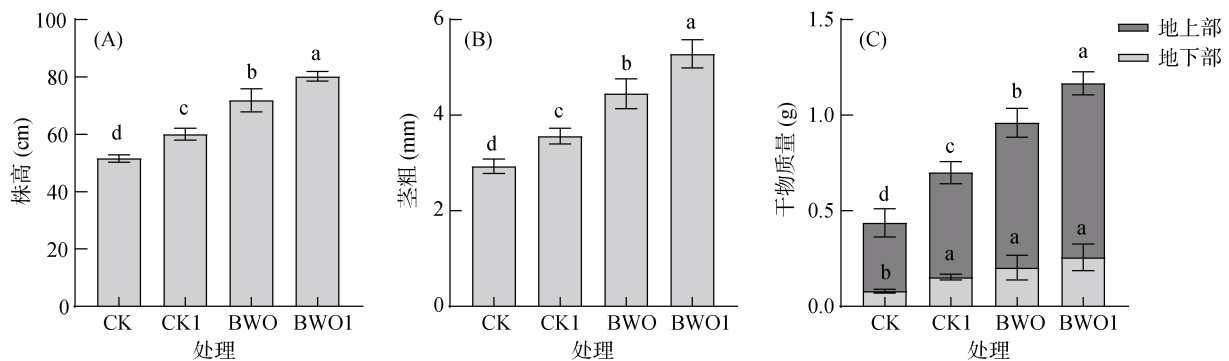
相对增量为 21.5%(图 2B); 植株地上部干物质质量显著增加 0.20 g, 相对增量为 57.1%( $P<0.05$ )(图 2C)。BWO1 处理相较于 BWO 处理的玉米株高显著增加 8.3 cm, 相对增量为 11.5%; 茎粗显著增加 0.83 mm, 相对增量为 18.6%; 植株地上部干物质质量显著增加

0.15 g, 相对增量为 21.3% ( $P < 0.05$ )。此外, BWO1 处理相较于 CK 处理的玉米株高、茎粗和地上部干物质量均显著增加, 相对增量分别为 55.5%、80.0% 和 152.7% ( $P < 0.05$ )。但 BWO1、BWO、CK1 处理的玉米地下部干物质量间并无显著差异。

植物的根系具有支撑、吸收传输、合成分泌、储存、呼吸等功能, 根系的形态特征能够直接影响植物地上部的生长。对玉米根系扫描后可以直观地发现, 经过交换性阳离子平衡后的土壤对玉米的生长具有积极影响, 玉米根系总根长、总根体积、根表面积、根尖数及分支数均有显著的增加(表 6、图 3)。CK1 处理的总根长达到 787.96 cm, 比 CK 处理的总根长增加了 95.2%; 总根体积为 0.78 cm<sup>3</sup>, 相比 CK 增加了 143.7%; 根表面积从 CK 处理的 40.13 cm<sup>2</sup> 增至 87.70 cm<sup>2</sup>, 相对增加了 118.5%; 根尖数及分支数相对增量分别是 76.7%、70.8%。同样, 与 BWO 处理相比, BWO1 处理的总根长、总根体积、平均根系直径、分支数显著

增加, 分别提升了 19.3%、40.0%、14.3%、36.6%。此外, 与 CK 相比, BWO1 处理的总根长、总根体积、根表面积、平均根系直径、根尖数和分支数均有显著增加, 分别提高 147.0%、425.0%、234.3%、50.0%、101.6%、134.3%。表明施用土壤改良剂并进行交换性阳离子平衡调理可以促进玉米根系生长发育, 提高根系对水分、养分的吸收, 从而促进整个植株的生长发育。

土壤交换性阳离子平衡对玉米苗期 Ca、Mg、K 元素含量的影响见图 4。通过计算植株体内 Ca、Mg、K 元素间的比例, 发现在 CK 处理中 Ca、Mg 比例为 10.56 : 4.27, CK1 处理中为 10.60 : 4.05, BWO 处理中为 12.21 : 4.33, BWO1 处理为 13.23 : 5.15, Ca、Mg 之间的比例约为 2.5。这与试验假设的土壤交换性阳离子比例 5 : 2 类似, 在添加土壤改良剂及经过交换性阳离子平衡调理后, 带入的养分离子会被植物根系吸收, 促进植物生长。



(A. 玉米植株株高; B. 玉米植株茎粗; C. 玉米植株干物质量。图柱上方小写字母不同表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同)

图 2 交换性阳离子平衡对玉米形态参数的影响

Fig. 2 Effects of exchangeable cations balance on morphological parameters of maize

表 6 交换性阳离子平衡对玉米根系形态的影响

Table 6 Effects of exchangeable cations balance on maize root morphology

处理	总根长(cm)	总根体积(cm <sup>3</sup> )	根表面积(cm <sup>2</sup> )	平均根系直径(mm)	根尖数	分支数
CK	403.60±39.71c	0.32±0.05d	40.13±5.37c	0.32±0.01c	1 400.67±149.58c	1 582.67±186.58c
CK1	787.96±53.68b	0.78±0.13c	87.70±10.50b	0.35±0.02c	2 475.67±66.89b	2 703.67±371.05b
BWO	835.15±136.22b	1.20±0.34b	111.86±25.00ab	0.42±0.03b	2 601.33±166.05a	2 713.33±109.70b
BWO1	996.71±31.87a	1.68±0.08a	134.14±13.11a	0.48±0.01a	2 824.00±169.89a	3 707.67±388.90a

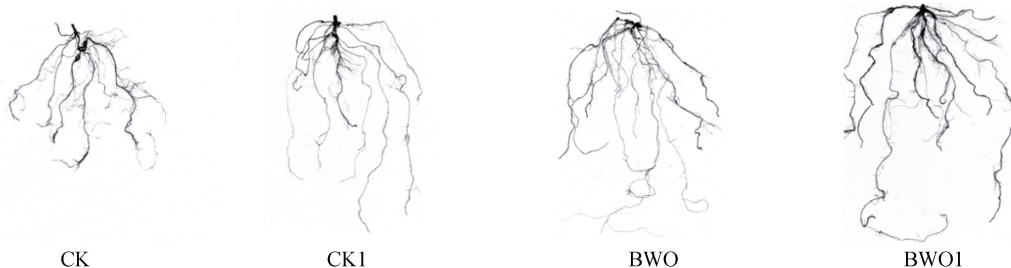
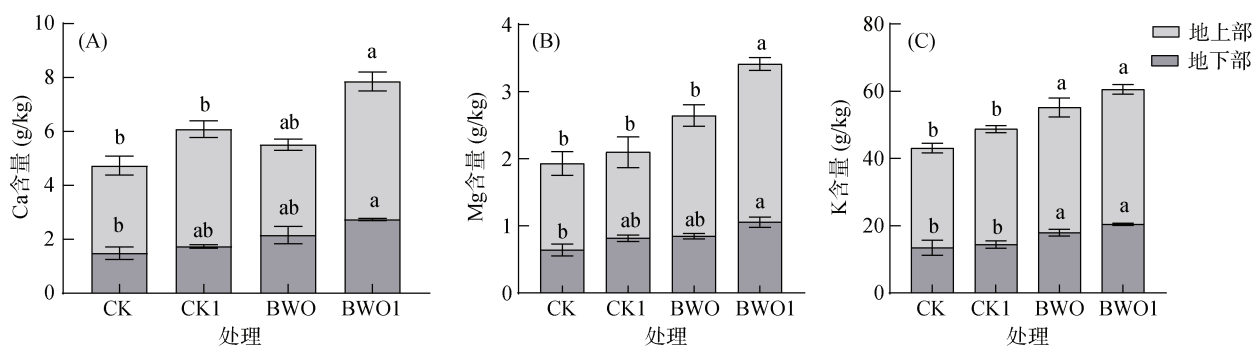


图 3 玉米根系形态扫描图像

Fig. 3 Maize root morphology scan



(A.玉米植株 Ca 含量; B.玉米植株 Mg 含量; C.玉米植株 K 含量)

图 4 阳离子平衡对玉米植株钙镁钾元素的影响

Fig. 4 Effects of cation balance on calcium, magnesium and potassium in maize plants

### 3 讨论

本研究致力于解决土壤养分缺乏、养分不平衡的问题,使用土壤增容、交换性阳离子平衡技术进行土壤改良。供试土壤为酸性红壤,其较低的养分库容以及盐基饱和度造成了红壤养分较其他类型土壤具有更低的保水保肥能力。针对红壤养分贫瘠的特点,施用能大幅提高土壤养分库容的土壤改良剂就显得尤为重要。目前土壤改良在提升土壤养分库容方面研究较少,而土壤阳离子交换量是衡量养分库容的重要指标<sup>[15]</sup>,市面上土壤改良剂种类繁多,但是具体对土壤养分库容并没有进一步的研究。

#### 3.1 施用土壤改良剂及有机肥对土壤养分库容的影响

本研究中,土壤增容试验旨在探究钙基膨润土、风化褐煤、有机肥 3 种改良剂对土壤阳离子交换量及盐基饱和度的影响。施用不同的土壤改良剂均可显著增加土壤养分库容,并且 3 种改良剂复配施用的效果最好(表 4)。

土壤阳离子交换量与土壤有机质、土壤质地密切相关<sup>[16]</sup>,土壤中有机的改变可以进一步改善土壤结构、增强土壤缓冲性能。研究表明,有机肥的施用增加了土壤有机质,有机质产生的有机酸通过酸溶作用促进矿物风化,通过络合作用增加矿物养分的有效性<sup>[17]</sup>。因此,土壤有机质是影响土壤阳离子交换量的重要因素,增加土壤有机质可以显著提高土壤阳离子交换量,这与已有研究结果<sup>[16, 18-19]</sup>一致。本研究结果表明,土壤阳离子交换量与交换性  $\text{Ca}^{2+}$  呈极显著的正相关关系。钙基膨润土其主要成分为蒙脱石,属于单斜晶系 2:1 型网架结构,该结构使其具有良好的吸附性、黏着性、阳离子交换性能等。且钙基膨润土还含有作物生长发育所需的中微量元素,如 Ca、Mg、K、Na、Fe、Cu、Zn 等。研究表明,施用膨润

土改良酸性土后,均增加土壤阳离子交换量与盐基离子总量<sup>[20]</sup>。风化褐煤主要成分为腐殖酸,腐殖酸具有离子交换性能,其中的羧基等含氧官能团中的  $\text{H}^+$  可以与土壤中交换性盐基离子交换形成腐殖酸盐,而且腐殖酸中的含氧官能团能与金属离子产生螯合反应,形成稳定配合物<sup>[21]</sup>。因此,伴随土壤阳离子交换量的提升,土壤交换性离子含量也随之提升。本研究结果表明,土壤阳离子交换量与电导率呈显著正相关关系( $r=0.72$ ,  $P<0.05$ ),施用土壤改良剂可以为土壤提供可溶性离子。钙基膨润土与风化褐煤为矿物型土壤改良剂<sup>[22]</sup>。矿物型土壤改良剂可以为作物提供养分,经过改良后的土壤中电导率值均有不同程度的升高,土壤的电导率值与土壤可溶性离子成正比<sup>[23]</sup>,表明施用土壤改良剂可以为土壤带入可溶性盐,增加土壤养分,这与廖辉煌等<sup>[24]</sup>的结果一致。从 WO 与 BWO 处理可以看出,土壤改良剂与有机肥配施下,有机质含量从 31.12 g/kg 显著提升至 36.61 g/kg,且土壤阳离子交换量与有机质呈现一定的正相关关系,证明土壤有机质含量影响土壤养分离子的交换能力。CK 处理的阳离子交换量只有 5.03 cmol/kg,是由于南方红壤地区降雨量大且雨水 pH 较低,导致土壤中 Ca、Mg、K、Cu 等元素的溶解性降低,易被土壤胶体中的  $\text{H}^+$ 、 $\text{Al}^{3+}$  代换,从而导致盐基离子的淋失。

#### 3.2 平衡盐基离子对玉米植株生长的影响

施肥平衡有助于作物生长发育,土壤中均衡的元素供给能促进植物根系对养分元素的吸收,从而促进植物地上部的生长。交换性阳离子平衡试验结果表明,当土壤中交换性  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$  比例趋近于 5:2:1、土壤盐基饱和度趋近于 80% 时,能显著提升玉米株高、茎粗、生物量,这与时功涛<sup>[25]</sup>的研究结果一致。现有研究发现,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$  与  $\text{Ca}^{2+}$  间存在拮抗作用,限制根系的吸收<sup>[26]</sup>。大量的研究表明, Mg 元素会显著减少作物对 K 的吸收, K 元素过

剩时,选择施用镁肥既可以降低作物对 K 元素的吸收,又会增加对 Mg 的吸收。因此,作物对 Ca、Mg、K 的吸收受多种因素影响,当土壤中交换性  $Mg^{2+}$  :  $K^+$  小于 2 时, K 元素在根系系统能抑制 Mg 的吸收, Mg、K 元素的拮抗作用抑制 Mg 元素向作物地上部移动,作物会表现缺 Mg 的症状<sup>[27]</sup>。

已有研究结果表明,植物根系表型受土壤理化性质的调控<sup>[28]</sup>。由于试验土壤是湖南永州典型酸性红壤, pH 较低,养分平衡处理对 CK 和 BWO 处理土壤玉米根系的总根长、总根体积、根表面积、平均根系直径、根尖数和分支数均有显著影响。产生这种差异的原因在于施用土壤改良剂缓解了土壤酸度,并且提供了有机养分。有研究表明<sup>[29]</sup>,在经过酸处理后,枳壳、资阳香橙两种柑橘砧木的根尖数、根分叉数、根体积、根表面积均有显著下降。低 pH 抑制根系生长发育,结合表 5 结果表明,交换性阳离子平衡对交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  含量及比值均有显著影响。按照传统施肥方法只施入土壤改良剂并不能平衡土壤中交换性阳离子,不合理的施肥制度会造成施肥过量、养分流失等问题,通过平衡交换性阳离子的方法可以精准调控土壤养分。

## 4 结论

1)钙基膨润土、风化褐煤、有机肥单独施用或配合施用均可以显著提升土壤阳离子交换量。

2)针对养分缺乏的红壤,在提升土壤阳离子交换量基础上进行土壤交换性阳离子平衡,增容土壤补充相应的钙镁钾肥,可以将土壤盐基饱和度提高至 80%,并使交换性  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  的比例趋近于 5 : 2 : 1,有效缓解土壤中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  的拮抗作用,改善土壤无机环境,从而显著促进玉米根系生长发育,并显著增加玉米苗期生物量。

本研究从土壤阳离子交换量及土壤交换性离子平衡两个角度为农业生产实践提供新的途径,通过该方法可以有效提升土壤养分库容,创造一个新的交换性离子平衡的土壤环境,从而确保植物健康生长。未来应在大田试验中进一步证明该方法的实用性并向农业生产中推广。

## 参考文献:

[1] 胡月明,欧阳村香,戴军,等.我国红壤资源农业利用研究进展[J].土壤与环境,1999(1):53-57.  
[2] 陈国徽,高冰可.浅析南方红壤退化原因及改良措施[J].安徽农学通报,2016,22(17):79-80.

[3] 刘纯利,田文平,刘字辉.农田土壤阳离子交换量与理化性质的相关性探析[J].种子科技,2021,39(10):36-37.  
[4] 孔令阳,殷书柏,刘吉平,等.三江平原碟形洼地-岛状林土壤阳离子交换量分布特征[J].科学技术与工程,2021,21(21):8828-8833.  
[5] 刘强,穆兴民,高鹏,等.土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J].水土保持研究,2020,27(6):386-392.  
[6] (日)长谷川李治著,谭俊杰,孙绥中,译.科学施肥新方法[M].北京:化学工业出版社,1989:24-65.  
[7] 赵鹏,黄占斌,任忠秀,等.中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J].排灌机械工程学报,2022,40(6):618-625.  
[8] 徐立铨.我国膨润土工业开发应用现状及发展对策[J].非金属矿,1989,12(2):38-39,37.  
[9] 马友华.膨润土在土壤改良和肥料生产上的研究和应用[J].矿产保护与利用,1996(1):26-29.  
[10] 李友伟,杨依彬,冯紫荟,等.3种磷肥与褐煤配施对苗期玉米磷吸收的影响[J].安徽农业科学,2023,51(20):150-152.  
[11] 丁佳惠,李革伟,尹俊慧,等.施用草炭及褐煤提高酸性土壤磷素有效性研究[J].磷肥与复肥,2019,34(10):36-40.  
[12] 范庆锋,虞娜,张玉玲,等.设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J].土壤学报,2014,51(5):1132-1137.  
[13] 闫静,时仁勇,王昌军,等.不同改良剂对酸性烟田的改良效果及其对烤烟生长的影响[J].土壤,2023,55(3):612-618.  
[14] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:25-30,178-183.  
[15] Hailegnaw N S, Mercl F, Pračke K, et al. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(5): 2405-2416.  
[16] 杨树俊,韩张雄,王思远,等.土壤阳离子交换量与有机质、机械组成的关系[J].科学技术与工程,2023,23(7):2799-2805.  
[17] 宁川川,王建树,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J].生态环境学报,2016,25(1):175-181.  
[18] 刘林云慧,吴妙兰,刘悦,等.广东鹤山两种人工林土壤阳离子交换量的特征及影响因素[J].土壤通报,2024,55(3):661-668.  
[19] 赵文瑞,张文娟,胡慧,等.海鲜壳生物质炭对酸性土壤的改良效果与机制探究[J].土壤,2023,55(5):1080-1087.  
[20] 易杰祥,刘国道,孙水芬,等.膨润土的土壤改良效果及其对作物生长的影响[J].安徽农业科学,2006,34(10):2209-2209,2212.  
[21] Havelcová M, Mizera J, Sýkorová I, et al. Sorption of metal ions on lignite and the derived humic substances[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(1): 559-564.

- [22] 尹万伟, 黄本波, 汪凤玲, 等. 土壤调理剂的研究现状与进展[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(2): 19–23.
- [23] 刘广明, 杨劲松. 土壤含盐量与土壤电导率及水分含量关系的试验研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(S1): 85–87.
- [24] 廖辉煌, 陈敏忠, 朱银玲, 等. 石灰及生物炭对酸性砖红壤的改良效果比较[J]. 热带农业科学, 2022, 42(2): 31–37.
- [25] 时功涛. 平衡施肥对辣椒生长和增产提质的影响[J]. 蔬菜, 2024(3): 43–47.
- [26] Wang Y L, Martins L B, Sermons S, et al. Genetic and physiological characterization of a calcium deficiency phenotype in maize[J]. G3, 2020, 10(6): 1963–1970.
- [27] 陈际型, 宣家祥. 低盐基土壤 K、Ca、Mg 的交互作用对水稻生长与养分吸收的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4): 433–439.
- [28] 蒙好生, 冯娇银, 胡冬冬, 等. 植物根系发育与养分的吸收[J]. 山西农业科学, 2017, 45(6): 1048–1052.
- [29] 李嘉伟. 不同 pH 对两种柑橘砧木植株生长、养分吸收和生理生化指标的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.

(责任编辑: 毛小芳)