



杭慧娴,陈硕,杨梦圆,等. 不同特肥配施在促进玉米生长中的效应研究[J]. 南京农业大学学报,2024,47(5):880-890.

HANG Huixian, CHEN Shuo, YANG Mengyuan, et al. Study on the effects of different special fertilizers used in combination to increase the growth of maize[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(5): 880-890.

不同特肥配施在促进玉米生长中的效应研究

杭慧娴,陈硕,杨梦圆,刘花,赵耕毛*

(南京农业大学资源与环境科学学院/海涂工程研究中心,江苏 南京 210095)

摘要:[目的]本文旨在研究不同特肥产品的养分效应及其施用方法,为玉米高产栽培提供理论依据。[方法]以市场主流特肥产品为研究对象,按其功能分类后布置盆栽试验,测试特肥产品对玉米生长的促进作用。通过 Pearson 相关性分析和主成分分析对玉米的 14 个指标进行综合评价,筛选出优质高效的特肥产品并予以复配施用。试验设 10 个处理:CK1(不施肥)、CK2(常规施肥)、T1(有机肥 O12+无机肥 I3+生物刺激素 M7)、T2(有机肥 O12+无机肥 I5+生物刺激素 M7)、T3(有机肥 O12+无机肥 I5+生物刺激素 M1)、T4(有机肥 O12+无机肥 I3+生物刺激素 M1)、T5(有机肥 O2+无机肥 I3+生物刺激素 M7)、T6(有机肥 O2+无机肥 I5+生物刺激素 M7)、T7(有机肥 O2+无机肥 I5+生物刺激素 M1)、T8(有机肥 O2+无机肥 I3+生物刺激素 M1),每处理 3 次重复,按随机区组排列设计。[结果]与 CK1 处理相比,特肥处理显著增加土壤的速效氮、有效磷、速效钾含量($P < 0.05$),然而 CK2 处理土壤的速效氮、有效磷、速效钾含量在整个生育期中均维持最高水平,6 叶期(35 d)时分别达到 46.0、38.9 和 179.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。玉米根系扫描结果显示,T4 处理对玉米根系发育具有明显促进作用,与 CK2 处理相比,其总根长、根体积、根总表面积、根尖数均显著增加,其增幅分别为 35.5%、43.9%、42.2%和 28.9%。各特肥处理也均促进了玉米对矿物质营养的吸收利用,根、茎、叶的 N、P、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺等元素含量明显增加。同时,特肥处理均显著促进玉米生长,其中 T4 处理均显著增加玉米株高、茎粗、茎叶鲜重、根鲜重。[结论]由有机肥、无机肥、生物刺激素复配而成的特肥能促进玉米营养吸收,协调玉米根系与茎叶生长,其中 T4 处理(3.0 t·hm⁻²有机肥 O12+45.0 kg·hm⁻²无机肥 I3+稀释 20 000 倍生物刺激素 M1 复配)为玉米最佳特肥施用方法。

关键词:玉米;特肥;配合施用;土壤养分;根系发育;促生作用

中图分类号:S147.3

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)05-0880-11

Study on the effects of different special fertilizers used in combination to increase the growth of maize

HANG Huixian, CHEN Shuo, YANG Mengyuan, LIU Hua, ZHAO Gengmao*

(College of Resources and Environmental Sciences/Coastal Land Engineering Research Center,
Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract:[Objectives] This research aimed to investigate the nutrient effects of various special fertilizers and their application methods, as well as to offer a theoretical foundation for the reasonable use of special fertilizers for high-yield of maize production. [Methods] The special fertilizers on the market were utilized as research materials, and the maize pot experiment was set up after they were sorted into functional categories. 14 maize parameters were thoroughly assessed using Pearson correlation analysis and principal component analysis. Effectively special fertilizers were then selected and used for culturing maize. 10 experimental treatments were set as follows: CK1 (no fertilizer), CK2 (conventional fertilization), T1 (organic fertilizer O12+inorganic fertilizer I3+bio-stimulant M7), T2 (organic fertilizer O12+inorganic fertilizer I5+bio-stimulant M7), T3 (organic fertilizer O12+inorganic fertilizer I5+bio-stimulant M1), T4 (organic fertilizer O12+inorganic fertilizer I3+bio-stimulant M1), T5 (organic fertilizer O2+inorganic fertilizer I3+bio-stimulant M7), T6 (organic fertilizer O2+inorganic fertilizer I5+bio-stimulant M7), T7 (organic fertilizer O2+inorganic fertilizer I5+bio-stimulant M1), and T8 (organic fertilizer O2+inorganic fertilizer I3+bio-stimulant M1), with three replications for each treatment, designed in randomized block arrangement. [Results] Compared with the CK1 treatment, the special fertilizer treatment significantly ($P < 0.05$) increased the soil content of available nitrogen, phosphorus, and potassium. However, the available nitrogen, phosphorus, and potassium in the CK2 treatment maintained the highest level throughout the reproductive period, reaching 46.0, 38.9 and 179.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, at the six-leaf stage (35 d). Root scanning results demonstrated that T4 treatment greatly accelerated the growth of maize

收稿日期:2023-10-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0900702,2020YFD0900703);国家自然科学基金中美联合项目(51961125103)

*通信作者:赵耕毛,教授,主要从事沿海滩涂盐碱地治理、耐盐植物品种选育与高效栽培、滩涂湿地生态修复、海水灌溉农业等方面的研究,
E-mail: seawater@njau.edu.cn。

roots, with a significant increase in total root length, root volume, total root surface area, and number of root tips, which increased by 35.5%, 43.9%, 42.2% and 28.9%, respectively, compared with the CK2 treatment. Additionally, the special fertilizer treatment accumulated N, P, K⁺, Ca²⁺, Na⁺ and Mg²⁺ in the maize tissues. Meanwhile, the special fertilizer treatments, especially for T4 treatment significantly promoted maize growth, plant height, stem thickness, leaf area, stem and leaf fresh weight, as well as root fresh weight. [Conclusions] The best special fertilizer application method for potted maize culture was set in T4 treatment, with dose for organic fertilizer O12 3.0 t·hm⁻², inorganic fertilizer I3 45.0 kg·hm⁻² and bio-stimulant M1 by root irrigation.

Keywords: maize; special fertilizer; combination application; soil nutrient; root development; growth promoting

我国耕地面积仅占世界耕地总量的7.8%,人均耕地面积只有世界水平的40%左右^[1]。随着工业化、城镇化快速发展,大量耕地资源被侵占,并且土地资源的不合理利用、农药化肥等滥用,造成严重的土地污染,大量的耕地资源流失,耕地质量退化^[2]。耕地质量直接关系我国粮食安全,科学施用特肥对于我国肥药双减、耕地质量提升和农作物提质增效具有重要意义。

2015年2月,农业农村部制定并下发了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》,2016年召开了首届中国国际特种肥料发展大会^[3],随后一系列优质国际特肥产品正式进入中国,国内传统肥料企业也纷纷开始研制特肥产品。近年来,特肥行业一直处于企业数量和用量猛增的阶段,中国特肥市场在经历了长期的产品技术革新和市场推广后,产品趋于成熟。特肥是指以特殊材料、特殊工艺生产出来的“高效环保、低碳节能”的功能性肥料,包括生物有机肥、缓释肥料、微生物菌剂、螯合微量肥、土壤调理剂等^[4]。生物有机肥是一种兼具微生物肥料和有机肥效应的肥料,在以动植物残体为主要成分的有机物料中添加处于活态的有益微生物^[5],可以活化土壤养分,增强土壤酶活性,改善土壤微生物种群结构。缓释型化学肥料中含有养分的化合物在土壤中释放速度缓慢,施用缓释肥料可以避免过量施肥引起烧苗的情况,同时还能减少肥料养分损失。微生物菌剂是将一些微生物如有效菌经生产、扩繁后加工成活菌制剂,可以改良土壤环境,增加微生物菌群数量,提高作物抗逆性^[6]。螯合微量肥是以螯合态的化学物为植物提供必需的微量元素,如EDTA-Fe、EDTA-Zn等,与无机微量元素肥料相比,螯合态元素在土壤中不易被固定,能更好地被植物吸收利用。土壤调理剂用以改善土壤物理性状,促进作物养分吸收,但其本身并不为植物提供养分。以上这些特肥具有明确的功能,对于改善土壤养分、促进植物营养吸收具有重要作用。近年来,特肥产品百花齐放,各种新理念、新技术、新产品不断涌现。由于特肥产品种类繁多,产品质量良莠不齐,并且出现肥型、肥量、肥法等错误,因此造成诸多负面影响。当前,有关综合的特肥产品质量评价及配施方法的研究鲜见报道,亟待深入研究。

本文以35种特肥为研究对象,针对玉米生长指标进行综合评价,筛选获得优质特肥产品。对筛选获得的有机、无机、生物刺激素等特肥产品进行配合施用,研究特肥产品对土壤理化性质、根系表型、养分吸收、玉米生长等影响,为科学施用特肥和玉米高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自江苏省镇江市句容市郭庄镇东岗村(119°16′N,31°95′E)。供试土壤0~20 cm土层基本理化性质为pH6.20、EC值0.37 mS·cm⁻¹、有机质1.06%、碱解氮20.46 mg·kg⁻¹、速效磷26.38 mg·kg⁻¹、速效钾0.07 g·kg⁻¹。供试玉米品种为‘长江玉6号’,由南京金盛达种子公司提供。底肥:商品有机肥(有机质≥30%)、硫酸钾型复合肥(N、P₂O₅、K₂O的质量分数分别为18%、9%、18%)、尿素(有效氮≥46.3%)、磷酸氢二铵(有效磷≥48.0%、有效氮≥18.0%)、七水合硫酸镁(镁≥9.9%)、四水合硝酸钙(钙≥16.9%),其用量分别为30、0.75、0.225、0.3、0.3和0.45 t·hm⁻²。供试肥料共计35种,分别采购自不同肥料生产或销售企业,包括12种有机肥、6种无机肥、7种生物刺激素、10种土壤调理剂。

1.2 试验设计

盆栽试验于2022年9月—2023年4月在南京农业大学资源与环境科学学院日光温室中进行,室温20~30℃,相对湿度在50%~60%,每日光照时间在11~12 h。将试验土壤风干后过筛(孔径为0.85 mm),与肥料混合均匀后装盆,使土壤含水量保持在田间持水量的80%,放置1周。选取大小一致、颗粒饱满的玉米种子,每盆播2粒,深度2 cm,播种结束,表面覆土,出苗后间苗。期间,土壤水分保持在60%~80%。盆钵随机摆放,每日调整位置,以保证玉米受光均匀。

1.2.1 特肥筛选试验 在市场上采购 35 种特肥产品,按其主要成分分为 12 种有机肥、6 种无机肥、7 种生物刺激素、10 种土壤调理剂。特肥种类及用量见表 1。

表 1 特肥种类及用量

Table 1 Special fertilizer type and dosage

肥料种类 Fertilizer type	编号 No.	产品来源 Source of the product	主要成分 Main components	用量/(t·hm ⁻²) Dosage
有机肥 Organic fertilizer	01	湖南长沙 Changsha, Hunan	鸡粪、羊粪、枯草芽胞杆菌、胶冻样芽胞杆菌 Chicken manure, sheep manure, <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Paenibacillus mucilaginosus</i>	3.00
	02	河南济源 Jiyuan, Henan	猪粪、兔粪、植材 Pig manure, rabbit manure, plant material	3.00
	03	北京丰台 Fengtai, Beijing	矿源腐殖质 Humus of mineral origin	3.00
	04	内蒙古 Inner Mongolia	羊粪、羊毛蛋白、腐殖酸 Sheep manure, wool protein, humic acid	3.00
	05	黑龙江牡丹江 Mudanjiang, Heilongjiang	秸秆、黄腐酸、蛋白石粉、麦饭石粉、动物源氨基酸 Straw, xanthic acid, opal powder, maifanite powder, amino acids from animal carcasses	3.00
	06	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	枯草芽胞杆菌、地衣芽胞杆菌、胶冻样芽胞杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Paenibacillus mucilaginosus</i>	3.00
	07	江苏徐州 Xuzhou, Jiangsu	腐殖酸 Humic acid	3.00
	08	江苏徐州 Xuzhou, Jiangsu	腐殖酸 Humic acid	3.00
	09	山东潍坊 Weifang, Shandong	厨余垃圾、昆虫 Food waste, insects	3.00
	010	山东潍坊 Weifang, Shandong	厨余垃圾、昆虫 Food waste, insects	3.00
	011	山东潍坊 Weifang, Shandong	厨余垃圾、昆虫 Food waste, insects	3.00
	012	山东青岛 Qingdao, Shandong	木薯渣、粮食饲料残渣、动物粪便 Cassava pomace, grain and feed residues, animal manure	3.00
无机肥 Inorganic fertilizer	I1	山东青岛 Qingdao, Shandong	乙二胺四乙酸螯合锌、铁、锰、铜、钴等中微量元素 EDTA-Zn, EDTA-Fe, EDTA-Mn, EDTA-Cu, EDTA-Co and other trace elements	稀释 1 500 倍, 叶面喷 施 Dilute 1 500 times, foliar spray
	I2	山东青岛 Qingdao, Shandong	氮、磷、钾的质量分数分别为 19%、8%、20% The mass fractions of nitrogen, phosphorus and potassium are 19%, 8% and 20%	0.45
	I3	山东青岛 Qingdao, Shandong	Ca ≥ 20.0%, Si ≥ 10.0%, Mg ≥ 1.0%, S ≥ 12.0%, Cu+ Fe+B+Mn+Zn ≥ 0.5%	0.045
	I4	山东青岛 Qingdao, Shandong	氮、磷、钾的质量分数分别为 22%、8%、17% The mass fractions of nitrogen, phosphorus and potassium are 22%, 8% and 17%	0.45
	I5	山东青岛 Qingdao, Shandong	CaO 28.0%, SiO ₂ ≥ 3.0%, Cu+Fe+Mn+Zn+B ≥ 0.1%	0.15
	I6	俄罗斯 Russia	Si	稀释 1 500 倍, 叶面喷 施 Dilute 1 500 times, foliar spray
生物刺激素 Bio-stimulant	M1	湖南长沙 Changsha, Hunan	枯草芽胞杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	一片兑 100 kg 水, 灌根 One tablet to 100 kg of water, irrigate roots
	M2	广东广州 Guangzhou, Guangdong	拜赖青霉、黄腐酸、氨基酸、钙+镁+硼+锰+铜+钼 ≥ 2.0% <i>Penicillium bilaiae</i> , xanthic acid, amino acid, Ca+Mg+B+ Mn+Cu+Mo ≥ 2.0%	2.25
	M3	广东广州 Guangzhou, Guangdong	哈茨木霉 <i>Trichoderma harzianum</i>	2.25
	M4	广东广州 Guangzhou, Guangdong	拜赖青霉 <i>Penicillium bilaiae</i>	稀释 5 倍, 浸种 Dilute 5 times, seed soaking
	M5	广东广州 Guangzhou, Guangdong	哈茨木霉 TH19 <i>Trichoderma harzianum</i> TH19	稀释 400 倍, 叶面喷施 Dilute 400 times, foliar spray
	M6	黑龙江哈尔滨 Harbin, Heilongjiang	枯草芽胞杆菌、地衣芽胞杆菌、胶冻样芽胞杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Paenibacillus mucilaginosus</i>	0.45
	M7	山东青岛 Qingdao, Shandong	有机质 62.8%、腐殖酸 60.0%、黄腐酸 18.0%、南非巨藻 提取物 18.0% Organic matter 62.8%, humic acid 60.0%, xanthic acid 18.0%, macroalgae extract from south Africa 18.0%	0.045

续表 1 Table 1 continued

肥料种类 Fertilizer type	编号 No.	产品来源 Source of the product	主要成分 Main components	用量/(t·hm ⁻²) Dosage
土壤调理剂 Soil conditioner	G1	山东潍坊 Weifang, Shandong	钙、镁、四种氨基酸 Ca, Mg, amino acids	稀释 1 000 倍, 灌根 Dilute 1 000 times, irrigate roots
	G2	河南郑州 Zhengzhou, Henan	矿石煅烧 Ore calcination	2.25
	G3	山东临沂 Linyi, Shandong	牡蛎壳 Oyster shell	3.00
	G4	四川乐山 Leshan, Sichuan	泥炭土、膨润土 Peat soil, bentonite	2.25
	G5	四川乐山 Leshan, Sichuan	蒙脱土 Montmorillonite	0.15
	G6	山西临汾 Linfen, Shanxi	硅、钙、镁及微量元素 Si, Ca, Mg and trace element	1.50
	G7	山西临汾 Linfen, Shanxi	硅、钙、镁及微量元素 Si, Ca, Mg and trace element	1.50
	G8	四川乐山 Leshan, Sichuan	镁铝硅酸盐 Magnesium aluminum silicate	1.50
	G9	云南昆明 Kunming, Yunnan	有机质、腐殖酸、活性钙镁铁等中微量元素 Organic matter, humic acid, active calcium, magnesium, iron and other trace elements	3.00
	G10	山东德州 Dezhou, Shandong	凹凸棒土、腐殖酸、羧甲基纤维素钠、聚丙烯酸钠 Attapulgit, humic acid, carboxymethylcellulose sodium, sodium polyacrylate	0.15
对照 Control	CK1			不施肥 No fertilizer
	CK2			常规施肥 Conventional fertilization

1.2.2 特肥配施试验 将特肥产品进行综合评价及主成分分析。特征值是衡量主成分影响力的重要指标,它代表引入该主成分可以解释平均多少原始标量的信息,如果特征值小于 1.0,表示该主成分的解释力非常低,一般以特征值大于 1.0 为筛选主成分的标准;贡献率为方差贡献率,是一个主成分所能够解释的方差占全部方差的比例,值越大,表明主成分综合原始变量的信息的能力越强。

根据特肥产品的综合评价值以及主要成分,选出有机肥、生物刺激素、无机肥各 2 种:有机肥选用不添加腐殖酸、动物蛋白等的普通有机肥产品;植物生物刺激素选用 1 种微生物菌剂、1 种腐殖酸类产品;无机肥选用含中微量元素的产品。将 3 类肥料配合施用,研究不同肥料组合对土壤理化性质以及玉米生长的影响,筛选最佳施肥组合并确定其施用方法。试验处理见表 2。

表 2 试验处理

Table 2 Experimental treatment

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer	无机肥 Inorganic fertilizer	生物刺激素 Bio-stimulant
T1	O12	I3	M7
T2	O12	I5	M7
T3	O12	I5	M1
T4	O12	I3	M1
T5	O2	I3	M7
T6	O2	I5	M7
T7	O2	I5	M1
T8	O2	I3	M1
CK1	不施肥 No fertilizer		
CK2	常规施肥 Conventional fertilization		

注:肥料代号同表 1。The code of fertilizer is the same as the Table 1.

1.3 样品采集与保存

玉米长至 6 叶期进行采样,各处理随机取 3 株,将地上部与根部分开,并用去离子水冲洗干净,一部分植株样品采集完毕迅速放入已编号的自封袋,置于放有冰袋的保温箱中保存,用于测定根系形态;另一部分用于农艺性状、生物量等测量,然后放入信封中于 105 °C 烘箱内杀青 20 min,并于 65 °C 烘干至恒重。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 植物相关指标测定 测定株高、茎粗、鲜重和干重。利用 YMJ-B 叶面积测量仪测定叶面积。每 6 d 用叶绿素测定仪测定 1 次叶绿素含量。用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后使用连续流动分析仪 (Auto Analyser AA3, Germany) 测定植株全氮含量,使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Agilent 700 Series ICP-OES, USA) 测定

植株磷、钾、钙、钠、镁含量。

1.4.2 植物根系形态测定 采用 Epson Expression 12000XL 型根系扫描仪对植株根系进行扫描,用 WinRHIZO 根系分析软件对图像进行分析,测定植物根系形态。

1.4.3 土壤性质测定 采用土壤养分速测仪测定土壤 pH 值、电导率、速效氮、速效磷、速效钾含量。

1.5 数据处理

采用 SPSS Statistics 26.0 软件对数据进行单因素方差分析、皮尔逊相关性分析以及主成分分析,采用 Duncan's 新复极差检验法($P<0.05$)进行显著性分析,采用 Excel 2019、Origin Pro 2023 等软件绘图。

2 结果与分析

2.1 基于主成分分析筛选优质肥料

2.1.1 不同指标相关性分析 从图 1 可知,玉米各指标间均存在显著相关性($P<0.05$)。采用主成分分析法对各指标进行归类分析,获得特肥产品的评价模型。

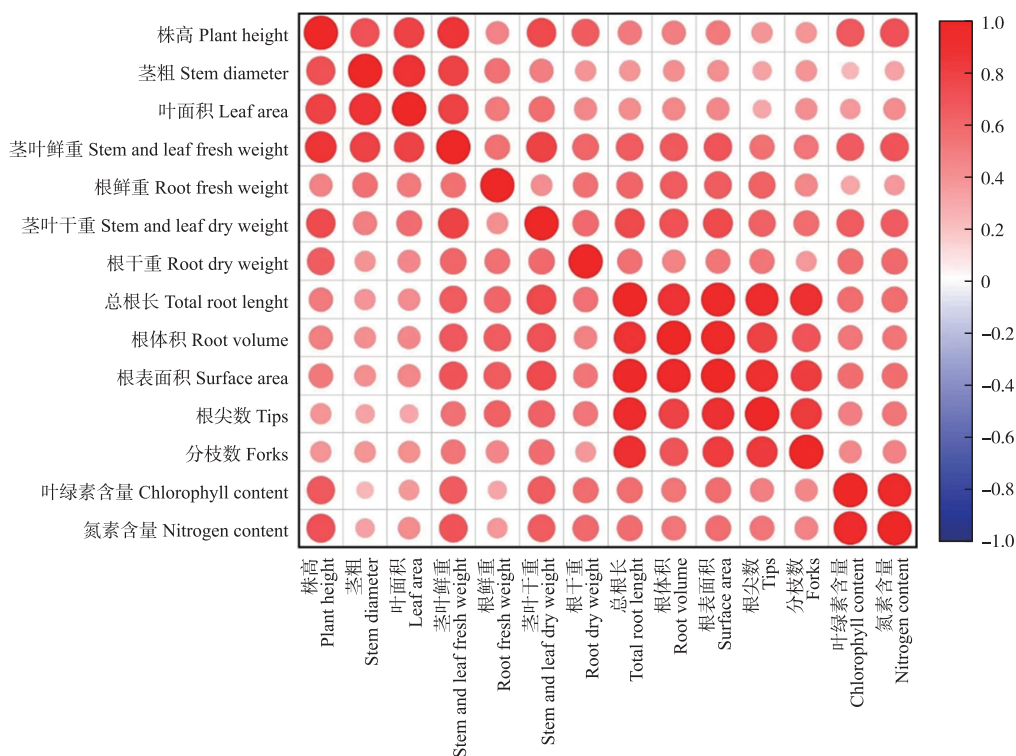


图 1 玉米各指标相关性热图

Fig. 1 Correlation heat map of each index of maize

2.1.2 不同指标主成分分析 基于 14 个表型性状进行主成分分析,以特征值大于 1.0 为主成分的筛选依据,将原来的 14 个单项指标转换成 3 个新的相互独立的综合指标,其贡献率分别为 58.43%、13.36% 和 10.26%,累计贡献率达到 82.05%(表 3)。3 个主成分综合了大部分玉米性状信息,反映不同肥料对玉米的综合效应。3 个主成分分别定义为 PC1、PC2、PC3。

表 3 主成分(PC)的特征值、贡献率和累计贡献率

Table 3 Eigenvalues of principal component(PC) and their contribution rate and cumulative contribution rate to total variance

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	8.18	58.43	58.43
2	1.87	13.36	71.79
3	1.44	10.26	82.05

2.1.3 综合评价 从表 4 可知,不同处理的综合评价值为-3.76~4.51,离散程度大,且各施肥处理的综合评价均高于对照处理,表明不同肥料对玉米根系发育以及植株生长均有较大影响。有机肥处理中最优

为 O11,生物刺激素处理中最优为 M7,无机肥处理中最优为 I3,土壤调理剂处理中最优为 G9。综合评价大于 1.00 的肥料中有机肥处理占 63.64%,表明有机肥在玉米生长过程中发挥着更为重要的作用。

表 4 不同肥料主成分得分、综合评价及品质排序

Table 4 The principal component score, comprehensive scores and quality ranking of different fertilizers

肥料编号 Fertilizer No.	主成分得分 Principal component score			综合得分 Comprehensive score	排序 Ranking	肥料编号 Fertilizer No.	主成分得分 Principal component score			综合得分 Comprehensive score	排序 Ranking
	$y(x_1)$	$y(x_2)$	$y(x_3)$				$y(x_1)$	$y(x_2)$	$y(x_3)$		
O11	8.05	-1.95	0.60	4.51	1	G4	0.75	-1.53	-0.87	0.14	20
O10	4.93	-0.11	-0.12	2.85	2	I4	0.22	-1.97	0.53	-0.08	21
O12	2.94	-1.56	0.42	1.55	3	G5	-0.02	-0.62	-0.03	-0.09	22
I3	2.53	0.74	-0.57	1.52	4	M6	-1.15	1.86	-0.21	-0.45	23
M7	2.24	1.22	0.18	1.49	5	I1	-1.26	1.83	0.22	-0.46	24
O2	2.61	-1.03	0.68	1.45	6	M2	-1.03	1.04	-0.22	-0.48	25
G9	2.31	0.11	-1.02	1.26	7	O9	-1.52	0.90	1.08	-0.65	26
O7	1.32	1.83	1.64	1.19	8	M5	-1.68	1.01	1.87	-0.65	27
O4	1.66	-0.17	1.63	1.12	9	I6	-1.56	1.28	0.14	-0.72	28
G7	1.53	1.54	-0.11	1.09	10	O6	-1.62	-1.12	0.39	-1.05	29
O3	2.09	-1.60	-0.08	1.00	11	M4	-2.23	0.89	-2.30	-1.42	30
I5	1.27	0.68	0.11	0.84	12	M3	-2.87	1.27	-0.23	-1.53	31
O1	1.34	-0.08	-0.47	0.72	13	G10	-2.89	0.00	-0.52	-1.74	32
M1	1.25	0.03	-0.37	0.70	14	G1	-3.60	2.24	-0.02	-1.81	33
O5	0.72	0.99	0.01	0.55	15	G2	-3.44	-0.04	0.47	-1.97	34
G3	1.27	0.33	-2.28	0.55	16	G8	-4.97	-3.22	-0.36	-3.04	35
O8	0.99	-1.11	0.45	0.48	17	CK2	-5.42	-1.61	0.95	-3.28	36
I2	0.77	-0.66	-0.82	0.27	18	CK1	-6.19	-1.95	1.10	-3.76	37
G6	0.63	0.56	-1.90	0.25	19						

2.2 不同肥料对土壤理化性质的影响

从图 2 可知,在 35 d 的玉米生长期土壤 EC 值波动明显,为 0.21~1.01 mS·cm⁻¹。常规施肥处理 EC 值(CK2)呈现快速上升后迅速下降的趋势,其他各处理 EC 值均呈快速增长至峰值稳定 7 d 后快速下降再缓慢上升的趋势。各处理土壤 pH 值为 5.63~6.71,pH 值随玉米生育期的推进呈快速下降再上升后缓慢下降的趋势。

在 35 d 的各处理玉米生长期土壤速效氮、速效磷、速效钾含量整体均呈上升的趋势,但各阶段变化趋势存在差异。除 CK2 处理外,各特肥处理土壤速效氮含量缓慢下降后又快速上升至峰值,再缓慢下降后又缓慢上升,而 CK2 处理则是缓慢下降后快速上升,再缓慢上升后又缓慢下降。除 CK2 及 T2 处理外,其他各处理土壤速效磷含量均呈上升趋势;而 CK2 处理土壤速效磷含量在 21 d 内快速增加,在 21~35 d 迅速下降;T2 处理在 14 d 内快速增加,14~28 d 快速下降,28~35 d 再缓慢增加。各特肥处理土壤速效钾含量在 28 d 内均呈缓慢上升的趋势,28~35 d 缓慢下降,而 CK2 处理在 21 d 内快速增加,在 21~28 d 缓慢下降,28~35 d 快速增加。此外,各特肥处理与 CK2 处理之间均差异显著,其中 CK2 处理土壤速效氮、速效磷、速效钾含量在整个生育期中维持最高水平,6 叶期(35 d)时分别达到 46.0、38.9 和 179.6 mg·kg⁻¹。

2.3 不同肥料配施对玉米根系表型参数的影响

从图 3 可知,T4 处理玉米的根系最发达,侧根及分枝较多。从表 5 可知,与常规施肥处理(CK2)相比,T4 处理显著增加玉米总根长、根体积、根表面积以及根尖数,分别增加 35.5%、43.9%、42.2%、28.9%。玉米根系平均直径为 0.46~0.62 mm,其中 T2 处理较常规施肥处理(CK2)显著增加 24.0%($P<0.05$)。玉米分枝数从大到小的处理依次为 T7、T4、CK2、T5、T6、T8、T2、T3、T1、CK1,其中 T7 处理较 CK2 处理增加了 9.4%($P<0.05$)。除根系平均直径及分枝数外,T4 处理其他 4 项根系指标均最佳,即有机肥(O12)、无机肥(I3)、生物刺激素(M1)配合施用能促进玉米根系生长发育。

2.4 不同施肥处理对玉米生长的影响

从图 4 可知,与 CK2 处理相比,T4 处理显著促进玉米株高、茎粗、茎叶鲜重和根鲜重,分别增加 23.0%、53.2%、70.4%和 76.1%。CK2 处理玉米的叶面积最大,其次是 T6 处理,二者差异显著,与 CK2 处理相比,T6 处理的叶面积减少 21.8%($P<0.05$)。除叶面积外,T4 处理其他 4 项生长指标均最佳,表明有机肥(O12)、无机肥(I3)、生物刺激素(M1)配合施用能够促进玉米生长发育。

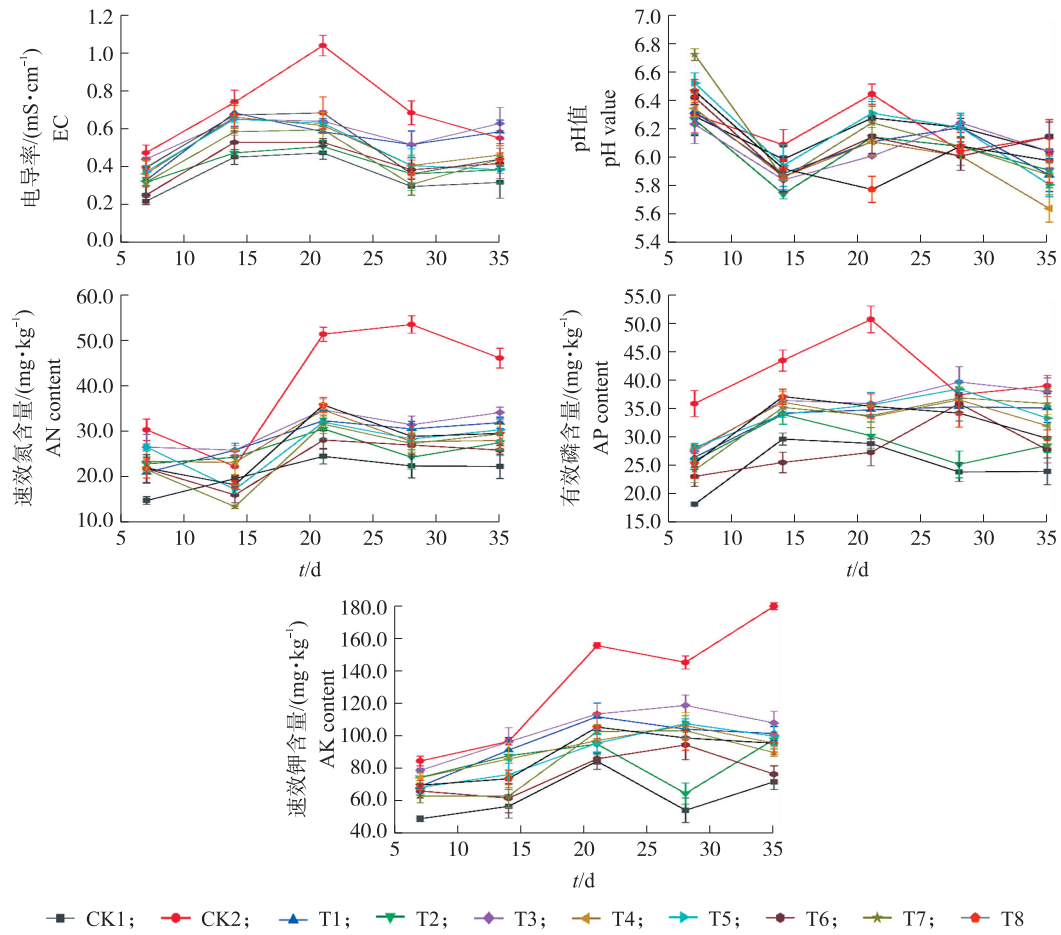


图2 不同施肥处理土壤 EC、pH 值、速效氮、速效磷、速效钾含量的变化

Fig. 2 Changes of soil EC, pH value, available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) in different fertilization treatments

以 35 d 玉米生长期的平均值进行差异显著性分析,误差线代表同一处理的 3 个平行之间的标准误。CK1:不施肥;CK2:常规施肥;T1:O12+I3+M7;T2:O12+I5+M7;T3:O12+I5+M1;T4:O12+I3+M1;T5:O2+I3+M7;T6:O2+I5+M7;T7:O2+I5+M1;T8:O2+I3+M1。下同。

A significant difference analysis are performed based on the average of the maize growth period at 35 d, and the error bars represent the standard error between the three parallels of the same treatment. CK1:No fertilizer;CK2:Conventional fertilization;T1:O12+I3+M7;T2:O12+I5+M7;T3:O12+I5+M1;T4:O12+I3+M1;T5:O2+I3+M7;T6:O2+I5+M7;T7:O2+I5+M1;T8:O2+I3+M1. The same as follows.

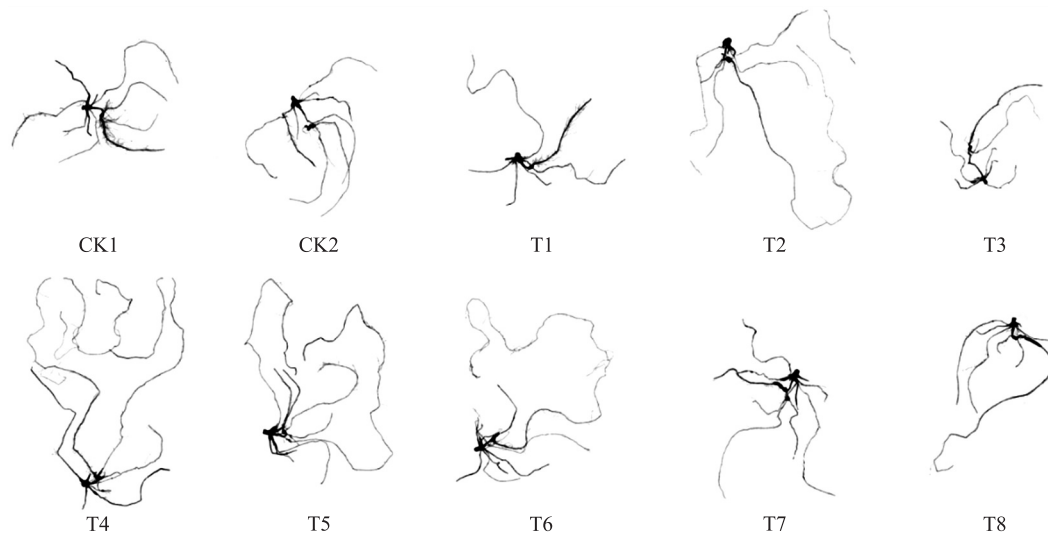


图3 不同施肥处理 6 叶期玉米根系形态扫描图

Fig. 3 Scan of maize root morphology at six leaf stage in different fertilization treatment

表 5 不同施肥处理玉米根系表型参数

Table 5 Maize root phenotype parameters in different fertilization treatments

处理 Treatment	总根长/cm Total length of root	根体积/cm ³ Root volume	平均根系直径/mm Mean root diameter	根总表面积/cm ² Total root surface area	根尖数 Tips	分枝数 Forks
CK1	144.69±2.50 ^h	0.36±0.01 ^g	0.43±0.01 ^f	25.30±1.31 ⁱ	630.33±4.62 ^g	382.67±3.84 ^h
CK2	280.78±4.84 ^d	0.57±0.01 ^c	0.50±0.01 ^{cd}	44.01±1.05 ^d	1 279.67±16.22 ^c	933.33±8.37 ^e
T1	210.43±2.54 ^g	0.52±0.01 ^{de}	0.58±0.01 ^b	38.47±0.50 ^{fg}	858.33±16.33 ^f	638.33±11.87 ^g
T2	262.18±3.40 ^e	0.49±0.01 ^e	0.62±0.01 ^a	39.58±0.59 ^{ef}	1 262.67±30.02 ^c	677.00±4.93 ^f
T3	225.62±4.25 ^f	0.38±0.02 ^g	0.47±0.03 ^{de}	33.51±0.52 ^h	995.67±8.45 ^e	683.00±13.43 ^f
T4	380.31±1.36 ^a	0.82±0.01 ^a	0.53±0.01 ^c	62.57±0.86 ^a	1 649.00±23.03 ^a	986.00±3.06 ^b
T5	323.55±5.59 ^b	0.78±0.01 ^b	0.57±0.01 ^b	55.70±0.43 ^b	1 089.67±41.57 ^d	783.67±4.81 ^d
T6	320.11±5.04 ^b	0.54±0.01 ^{cd}	0.53±0.01 ^c	47.50±0.49 ^c	1 349.00±21.55 ^b	941.67±8.29 ^d
T7	304.71±2.04 ^c	0.45±0.01 ^f	0.46±0.01 ^{ef}	41.52±0.46 ^c	1 631.00±7.55 ^a	1 021.00±13.65 ^a
T8	261.69±3.06 ^e	0.51±0.01 ^{de}	0.59±0.01 ^{ab}	37.14±0.33 ^g	959.67±9.26 ^e	755.53±3.18 ^e

注:同列不同小写字母代表不同施肥处理在 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences in different treatments at 0.05 level. The same below.

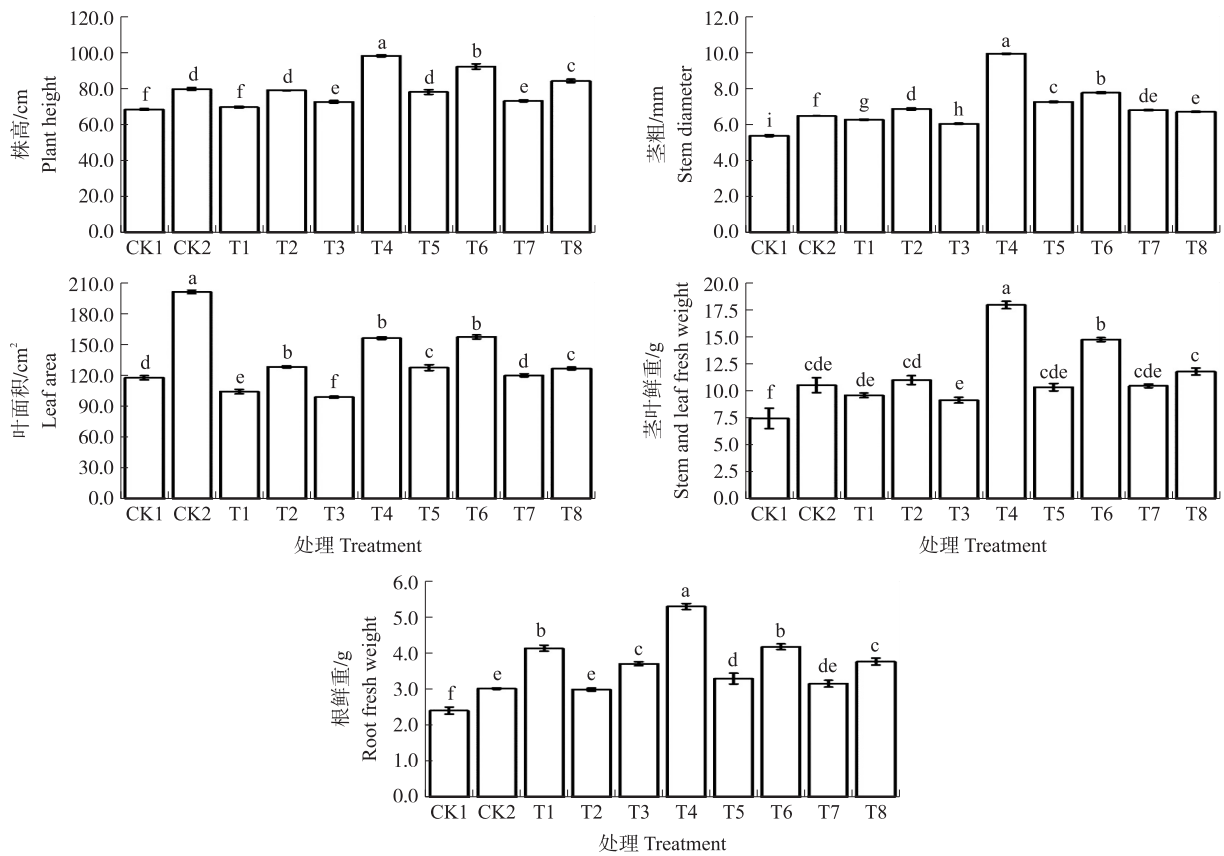


图 4 不同施肥处理对玉米株高、茎粗、叶面积、茎叶鲜重、根鲜重的影响

Fig. 4 Effects of different fertilization treatments on plant height, stem diameter, leaf area, stem and leaf fresh weight and root fresh weight of maize

不同小写字母代表不同施肥处理在 0.05 水平上差异显著。The different lowercase letters represent significant differences at 0.05 level in different fertilization treatments.

2.5 不同施肥处理对玉米吸收矿质营养的影响

玉米苗期 N、P、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 主要在地上部积累,Na⁺ 则主要在地下部积累。从表 6 可知:与 CK2 处理相比,T1 处理显著促进玉米地上部和地下部 N 元素吸收,分别为 18.95 和 8.83 mg·g⁻¹,较 CK2 处理分别增加 6.3%和 15.4%(P<0.05)。玉米地上部 P 含量为 2.09~3.28 mg·g⁻¹,T6 处理最高,较 CK2 处理增加了 13.9%(P<0.05);玉米地下部 P 含量为 0.58~1.22 mg·g⁻¹,T5 处理最高,较 CK2 处理显著增加 11.93%(P<0.05)。CK2 处理玉米地上部 K⁺ 含量显著高于其他处理;T2 处理玉米地下部 K⁺ 含量最高,达到 20.69 mg·g⁻¹,与 CK2 处理相比增加了 53.5%(P<0.05)。T1 处理玉米地上部、地下部 Ca²⁺ 含量最高,分别为 13.60 和 6.21 mg·g⁻¹,与 CK2 处理相比分别增加了 17.0%和 129.2%(P<0.05)。玉米地上部 Na⁺ 含量为

0.27~0.94 mg·g⁻¹, T7 处理最高, 是 CK2 处理的 2.14 倍; 玉米地下部 Na⁺ 含量从大到小的处理依次为 T1、T7、T3、T2、T5、T4、T6、T8、CK2、CK1, T1 处理含量最高, 为 3.44 mg·g⁻¹, 是 CK2 处理的 1.9 倍。各处理玉米地上部以及地下部 Mg²⁺ 含量均显著高于 CK2 处理, 其中 T6 处理地上部 Mg²⁺ 含量最高, 为 7.31 mg·g⁻¹, 与 CK2 处理相比增加了 49.5% ($P < 0.05$), T1 处理地下部 Mg²⁺ 含量最高, 为 5.90 mg·g⁻¹, 与 CK2 处理相比增加了 92.8% ($P < 0.05$)。

表 6 不同施肥处理对玉米地上部和地下部元素含量的影响
Table 6 Effects of different fertilization treatments on elements content in the aboveground and underground of maize

部位 Part	处理 Treatment	元素含量/(mg·g ⁻¹) Element content					
		N	P	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺
地上部 Aboveground	CK1	15.25±0.28 ^c	2.09±0.05 ^f	65.43±0.50 ^f	12.43±0.38 ^{bcd}	0.64±0.03 ^d	6.93±0.07 ^b
	CK2	17.82±0.38 ^{ab}	2.88±0.03 ^{bc}	84.00±0.14 ^a	11.62±0.28 ^{cde}	0.44±0.03 ^f	4.89±0.03 ^f
	T1	18.95±0.15 ^a	2.93±0.05 ^b	82.71±0.24 ^a	13.60±0.26 ^a	0.53±0.03 ^{ef}	6.37±0.02 ^d
	T2	16.84±0.73 ^{bc}	2.32±0.06 ^e	70.22±0.75 ^d	12.40±0.26 ^{bcd}	0.78±0.01 ^b	6.29±0.05 ^{de}
	T3	17.90±0.72 ^{ab}	2.52±0.08 ^d	76.49±0.64 ^b	12.51±0.41 ^{bc}	0.65±0.03 ^{cd}	6.21±0.05 ^e
	T4	16.95±0.83 ^{bc}	2.10±0.02 ^f	67.73±0.24 ^e	10.93±0.34 ^e	0.60±0.03 ^{de}	6.44±0.06 ^{cd}
	T5	18.34±0.74 ^{ab}	3.07±0.09 ^b	71.80±0.52 ^e	12.56±0.50 ^{abc}	0.43±0.02 ^f	6.56±0.03 ^c
	T6	16.97±0.63 ^{bc}	3.28±0.03 ^a	59.89±0.85 ^g	11.43±0.33 ^{de}	0.27±0.03 ^g	7.31±0.04 ^a
地下部 Underground	T7	17.34±0.17 ^{ab}	3.00±0.10 ^b	72.47±0.31 ^e	12.59±0.01 ^{abc}	0.94±0.06 ^a	6.33±0.05 ^{de}
	T8	16.49±0.58 ^{bc}	2.71±0.06 ^e	66.62±0.44 ^{ef}	12.79±0.24 ^{ab}	0.74±0.02 ^{bc}	6.20±0.04 ^e
	CK1	4.10±0.09 ^h	0.58±0.03 ^f	9.62±0.26 ^g	2.74±0.30 ^h	1.43±0.04 ^f	2.93±0.08 ^g
	CK	7.65±0.04 ^d	1.09±0.2 ^{bc}	13.48±0.30 ^f	2.71±0.16 ^h	1.86±0.06 ^e	3.06±0.06 ^g
	T1	8.83±0.03 ^a	1.13±0.02 ^{ab}	19.16±0.32 ^b	6.21±0.09 ^a	3.44±0.09 ^a	5.90±0.02 ^a
	T2	8.19±0.13 ^{bc}	1.13±0.03 ^{ab}	20.69±0.64 ^a	5.49±0.08 ^{bc}	2.55±0.05 ^e	4.69±0.08 ^d
	T3	8.28±0.05 ^b	0.97±0.03 ^{de}	17.20±0.18 ^d	5.03±0.04 ^{de}	2.93±0.04 ^b	4.96±0.10 ^c
	T4	7.00±0.11 ^c	1.00±0.02 ^{cd}	17.37±0.49 ^{cd}	4.69±0.03 ^{ef}	2.21±0.03 ^d	4.36±0.07 ^e
T5	8.32±0.8 ^b	1.22±0.06 ^a	18.62±0.44 ^{bc}	5.37±0.09 ^{cd}	2.48±0.04 ^c	5.37±0.06 ^b	
T6	7.97±0.09 ^c	1.11±0.01 ^b	18.19±0.43 ^{bcd}	4.61±0.08 ^f	1.96±0.03 ^e	4.28±0.09 ^e	
T7	5.76±0.06 ^g	1.00±0.02 ^{cd}	18.55±0.43 ^{bcd}	5.78±0.03 ^b	3.00±0.10 ^b	5.23±0.03 ^b	
T8	6.65±0.07 ^f	0.88±0.04 ^e	15.56±0.59 ^e	4.12±0.07 ^g	1.91±0.07 ^e	4.00±0.14 ^f	

2.6 主成分分析及综合评价

采用主成分分析进行降维得表 7 中的 4 种主成分, 其累计贡献率达 85.51%, 表征绝大部分原始指标, 采用 4 个主成分替代原始指标进行综合评价。特肥配施处理的主成分得分及综合评价的分析结果如表 8 所示, 综合分值越高, 该处理的综合表现越好。根据主成分综合得分可知, T4 处理综合表现最优, 综合得分为 1.78。

表 7 PC 的特征值、贡献率和累计贡献率

Table 7 Eigenvalues of PC and their contribution rate and cumulative contribution rate to total variance

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	5.83	41.66	41.66
2	3.37	24.05	65.71
3	1.72	12.26	77.97
4	1.06	7.55	85.51

表 8 不同处理主成分得分、综合评价及品质排序

Table 8 The principal component score, comprehensive score and quality ranking of different treatments

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score				综合得分 Comprehensive score	排序 Ranking
	$y(x_1)$	$y(x_2)$	$y(x_3)$	$y(x_4)$		
T4	4.71	-1.21	0.55	0.50	1.78	1
CK2	0.87	3.63	0.63	-0.53	1.27	2
T6	1.79	-1.51	-0.81	0.58	0.33	3
T5	0.99	-0.34	0.93	-1.77	0.31	4
T7	0.60	0.86	-2.14	0.22	0.21	5
T3	-1.88	1.67	0.20	1.06	-0.28	6
T8	-0.48	-0.71	0.32	0.05	-0.33	7
T1	-1.79	0.63	1.30	0.32	-0.41	8
T2	-0.50	-0.60	-1.10	-0.29	-0.51	9
CK1	-4.30	-2.40	0.11	-0.14	-2.37	10

3 讨论

近年来,我国加快集成推广化肥减量增效的绿色高效技术模式,特肥作为一种高效环保、低碳节能的功能性肥料应运而生并快速发展。特肥涉及生物有机肥、缓释肥料、生物刺激素、土壤调理剂等。本研究对35种特肥产品进行综合评价,发现有机肥在玉米生长中发挥着更重要的作用,并且无机肥中的中微量元素特肥以及生物刺激素类特肥也具有明显效果。有机肥含大量的碳水化合物和矿质元素,能够为微生物大量繁殖提供充足的碳源、氮源、无机盐等^[7-8],但肥效发挥较慢,单一施用时会导致作物生产力水平低于无机肥^[9];中微量元素肥富含钙、镁、锌等中微量元素,营养全面、用量少、吸收快,利用率极高,但其不含有机质,长期连续单独施用会破坏土壤结构,影响土壤微生物的繁殖;生物刺激素有助于促进作物生长,被认为是化肥减施增效的重要手段^[10],而单独施用不能满足植物生长的需求,需以有机肥为载体,才能更好地发挥效果。王佰成^[11]在玉米绿色肥料配方的筛选研究在中发现将有机肥、无机肥、菌剂配施能够提高肥料的利用率,改善土壤结构,提高玉米品质。

本研究中,相对于不施肥处理(CK1),多种特肥配施能够提升土壤肥力,这与Zhao等^[12]的研究结果一致。然而,与常规施肥处理(CK2)相比,各特肥配施处理的EC值、pH值以及速效养分含量均较低,这是由于常规施肥用量较多,而特肥产品配施时考虑土壤EC值并顺应减肥减药号召,用量均相对较少,因此在土壤养分提升方面效果略差于常规施肥处理。

根系是作物提取土壤中的矿物质营养和水分的关键器官,其生长情况对作物生长发育具有重要影响。Devi等^[13]研究表明多种肥料配施能够促进大豆根系发育,增加根瘤数。葛君等^[14]研究表明有机肥无机肥、EM菌剂配合施用能够显著促进小麦根系生长,同时还能减少无机肥的用量。本研究中,与常规施肥(CK2)相比,有机肥O12、无机肥I3、生物刺激素M1配合施用(T4处理)显著增加了玉米根系的总根长、根体积、根表面积、根尖数,同时显著增加玉米植株的株高、茎粗、茎叶鲜重、根鲜重。有机肥O12中含木薯渣、粮食饲料残渣等,其结构疏松,能够改善土壤通气性,有利于玉米根系的延伸^[15],促进根系生长发育^[16];无机肥I3中含Si、Ca、Cu、Fe、Mn、Zn、B等中微量元素,能够维持土壤养分元素平衡;生物刺激素M1中的枯草芽孢杆菌能够提高土壤酶活性,促进土壤养分溶解,更利于植物吸收^[17]。

矿质元素是植物生长的必需元素,可以保证植物健康生长^[18]。多种肥料配施可以显著提高玉米^[19]、葡萄^[20]矿质元素含量及产量,促进其生长。本研究表明,与常规施肥处理(CK2)相比,各特肥配施处理促进了玉米根、茎、叶对N、P、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺的吸收。本研究还发现,T4处理玉米各生长指标及根系参数均最佳,但T1处理玉米根、茎、叶矿质元素含量较高。植物矿质元素含量与植物生长情况之间是否存在相关性还需要更深入研究。

综上所述,将有机肥、无机肥、生物刺激素3种特肥配合施用可以提升土壤养分,促进玉米根系及植株生长发育,促进植物营养吸收。综合考虑玉米各项指标和土壤性质,优选T4处理(3.0 t·hm⁻²有机肥O12+45.0 kg·hm⁻²无机肥I3+生物刺激素M1灌根)为本研究盆栽玉米生长的最适施肥方法。

参考文献 References:

- [1] 朱亮亮,赵东,严家家,等.我国耕地质量现状及提升建议[J].山西农经,2021(11):159-160.
Zhu L L,Zhao D,Yan J J, et al. Present situation of cultivated land quality in China and suggestions for improvement[J]. Shanxi Agricultural Economy,2021(11):159-160(in Chinese).
- [2] 李廷强,郝点.我国耕地“非粮化”现状及其复耕培肥技术研究进展[J].应用生态学报,2023,34(6):1703-1712.
Li T Q,Hao D. Current situation of “non-grain production” of cultivated land in China and the research progress of re-tillage and fertilization technology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(6):1703-1712(in Chinese with English abstract).
- [3] Liu J,Li H,Yuan Z, et al. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology and water use efficiency of tomato in greenhouse[J]. Scientia Horticulturae,2024,323:112553.
- [4] 谢阳军.土壤肥料对农业可持续生产的运用研究[J].农业开发与装备,2022(7):85-86.
Xie Y J. Study on the application of soil fertilizer to sustainable agricultural production[J]. Agricultural Development & Equipments,2022(7):85-86(in Chinese).
- [5] 徐振华.河北省特种肥料发展现状及市场前景[J].种子科技,2019,37(12):141-142.
Xu Z H. Development status and market prospect of special fertilizer in Hebei Province[J]. Seed Science & Technology,2019,37(12):141-142(in Chinese).

- [6] Liu S, Zhang P, Wang X, et al. Comparative analysis of different bio-organic fertilizers on growth and rhizosphere environment of grapevine seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 324: 112587.
- [7] 李晶, 陈宪信, 陈亮, 等. 微生物菌剂与有机无机肥配施对重茬土壤改良和大蒜生长的影响[J]. *河北农业科学*, 2020, 24(4): 71-76.
Li J, Chen X X, Chen L, et al. Effects of microbial agents combined with organic and inorganic fertilizers on continuous cropping soil improvement and growth of garlic[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(4): 71-76 (in Chinese with English abstract).
- [8] 吕亮雨, 段国珍, 苏彩凤, 等. 木霉菌微生物菌剂对枸杞生长及土壤性状的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2022, 53(4): 476-482.
Lü L Y, Duan G Z, Su C F, et al. Effects of microbial agents on growth and soil properties of *Lycium barbarum* L[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2022, 53(4): 476-482 (in Chinese with English abstract).
- [9] Wei W, Yan Y, Cao J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: an integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 225: 86-92.
- [10] 李炳言, 宋大利, 王秀斌, 等. 不同生物刺激素对玉米生长及土壤微生物群落结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 2172-2180.
Li B Y, Song D L, Wang X B, et al. Effects of bio-stimulants on maize growth and soil microbial community structure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 2172-2180 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王佰成. 玉米绿色肥料配方的筛选研究[J]. *农业开发与装备*, 2019(7): 114-115.
Wang B C. Screening study of green fertilizer formulations for maize[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2019(7): 114-115 (in Chinese).
- [12] Zhao J W, Zhou L R. Combined application of organic and inorganic fertilizers on black soil fertility and maize yield[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2011, 18(2): 24-29.
- [13] Devi K N, Singh T B, Athokpam H S, et al. Influence of inorganic, biological and organic manures on nodulation and yield of soybean (*Glycine max* Merrill L.) and soil properties[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2013, 7(9): 1407-1415.
- [14] 葛君, 孟自力, 张志标, 等. 肥料配施对小麦根系、根际土壤微生物及秸秆养分积累的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(11): 214-219.
Ge J, Meng Z L, Zhang Z B, et al. Effects of fertilizer application on soil microorganisms in wheat root system and rhizosphere and nutrient accumulation in straw[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(11): 214-219 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李媛, 黄婷, 甘泉峰, 等. 生物基复合改良剂对耐盐紫花苜蓿根系生长的调控作用[J]. *南京农业大学学报*, 2022, 45(6): 1183-1193.
DOI: 10.7685/jnau.202112007.
Li Y, Huang T, Gan Q F, et al. Effects of bio-based compound amendments on root growth of salt-tolerant alfalfa[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, 45(6): 1183-1193 (in Chinese with English abstract).
- [16] Hochholdinger F, Yu P, Marcon C. Genetic control of root system development in maize[J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(1): 79-88.
- [17] 王琳, 胡凯基, 及华, 等. 枯草芽孢杆菌不同施用次数对金银花生长和品质的影响[J]. *河北农业科学*, 2023, 27(2): 59-63, 108.
Wang L, Hu K J, Ji H, et al. Effects of different application times of *Bacillus subtilis* on the growth and quality of *Lonicera japonica*[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2023, 27(2): 59-63, 108 (in Chinese with English abstract).
- [18] de Bang T C, Husted S, Laursen K H, et al. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(5): 2446-2469.
- [19] 张盼盼, 乔江方, 李川, 等. 氮锌配施对夏玉米籽粒矿质元素含量和累积量的影响[J]. *华北农学报*, 2023, 38(3): 87-99.
Zhang P P, Qiao J F, Li C, et al. Effect of nitrogen and zinc application on the concentration and accumulation of mineral elements in the grain of summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(3): 87-99 (in Chinese with English abstract).
- [20] 史祥宾, 姚成盛, 张金亮, 等. 配方施肥对‘红地球’葡萄果实产量和品质以及矿质元素含量的影响[J]. *中国果树*, 2022(9): 46-50.
Shi X B, Yao C S, Zhang J L, et al. Effects of formula fertilization on fruit yield, quality and mineral element content of ‘Red Globe’ grape[J]. *China Fruits*, 2022(9): 46-50 (in Chinese).

责任编辑: 刘怡辰