

海藻酸复合磷肥对玉米产量 与土壤养分的影响

马金昭¹, 孙瑶², 辛鑫¹, 戚兴超¹,
张泽浩¹, 马宁³, 柳小琪⁴, 王修康³

(1. 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603; 2. 烟台市农业技术推广中心, 山东 烟台 264000;
3. 五洲丰农业科技有限公司, 山东 烟台 264000; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 研究海藻酸复合磷肥对玉米产量和土壤养分供应强度的影响可为其推广应用提供理论依据。以‘郑单958’品种玉米为材料进行连续2 a的大田试验, 设置不施磷肥(CK)、磷酸二铵(DAP)、海藻酸复合磷肥(NI)、海藻酸复合磷肥减量(MI)4个处理, 测定玉米产量及生长特性、植株养分含量、土壤养分含量以及磷肥利用率等指标。结果表明: NI处理在2 a间较CK处理显著增产17.1%~24.3%, 在第2 a较DAP处理显著增产6.7%, 生物量、株高、茎粗与叶绿素含量也显著增加。NI处理叶片全磷含量较CK和DAP处理分别显著增加66.1%和23.4%, 且NI与MI处理磷素回收利用效率较DAP处理分别显著增加134.5%与89.3%。NI处理土壤有效磷较CK处理在2 a间显著增加30.9%~59.9%, 较DAP处理显著增加13.8%~17.2%, DAP与MI处理间无显著差异; 不同磷肥处理与年份因素在土壤有效磷和全磷含量上有显著的正交互作用。相关性分析表明, 土壤有效磷与玉米的产量、株高、茎粗及其叶绿素含量呈显著正相关。与磷酸二铵相比, 海藻酸复合磷肥显著提高了土壤有效磷含量及其磷肥利用率, 促进了玉米的生长发育、养分积累及其产量的提高。

关键词: 玉米; 海藻酸复合磷肥; 产量; 土壤养分; 磷肥利用率

中图分类号: S513 **文献标志码:** A

Effects of alginic acid compound phosphate fertilizer on maize yield and soil nutrients

MA Jinzhao¹, SUN Yao², XIN Xin¹, QI Xingchao¹,
ZHANG Zehao¹, MA Ning³, LIU Xiaoqi⁴, WANG Xiukang³

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China; 2. Yantai Agricultural Extension Center, Yantai, Shandong 264000, China; 3. Wuzhoufeng Agricultural Technology Co., Ltd., Yantai, Shandong 264000, China; 4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This study examined the effects of alginate phosphorus compound fertilizer on maize yield and soil nutrient supply intensity to provide a scientific basis for the proper usage of the fertilizer. A two-year field experiment with maize ‘Zhengdan 958’ was conducted to explore the effects of different phosphate fertilizer treatments on maize yield, growth characteristics, plant nutrient content, soil nutrient content, and phosphate fertilizer utilization rate. There were four treatments: no phosphate fertilizer (CK), diammonium phosphate (DAP), alginate compound phosphate fertilizer (NI), and alginate compound phosphate fertilizer decremented (MI). The results showed that the yield in the NI treatment increased by 17.1%~24.3% in the two years compared with the CK treatment. The yield was increased by 6.7% compared with DAP treatment in the second year. Biomass, plant height, stem diameter, and leaf SPAD values also increased significantly under the NI treatment. The total phosphorus con-

tent in the NI treatment increased by 66.1% compared with CK, and 23.4% compared with DAP treatment, and the phosphorus utilization rate of the NI and MI treatments increased significantly by 134.5% and 89.3%, respectively. Soil available phosphorus in the NI treatment increased by 30.9%~59.9% compared with the CK treatment, and by 13.8%~17.2% compared with the DAP treatment in the two years. There was no significant difference between the DAP and MI treatments. There was a significant positive interaction between the different phosphorus fertilizer treatments and the year factor on the soil available phosphorus and total phosphorus contents. Correlation analysis showed that soil available phosphorus was positively correlated with maize yield, plant height, stem diameter, and SPAD. Compared with traditional diammonium phosphate, alginate compound phosphate fertilizer increased the content of available phosphorus in the soil and the utilization rate of phosphate fertilizer, and significantly promoted the growth, nutrient accumulation, and yield of maize.

Keywords: maize; alginic acid compound phosphate fertilizer; yield; soil nutrient; utilization efficiency of phosphate fertilizer

玉米是我国重要的粮食作物,其产量已超过小麦和水稻,在保障我国粮食安全中发挥着重要作用^[1]。磷是植物蛋白质、核酸等物质的核心元素,参与植物体糖酵解、核苷酸代谢和膜磷脂合成等多种生理生化过程,是植物生命发育过程中不可缺少的元素^[2-4]。玉米作为典型的磷敏感型作物,土壤中磷素的供应情况对其生长发育及产量至关重要^[2]。施用磷肥是提高土壤供磷能力和玉米产量的主要措施^[5],然而磷肥在土壤中容易被矿物质吸附、沉淀或经微生物固持转化为磷酸盐,难以被作物吸收利用^[6-7]。研究表明,我国磷肥的当季利用率只有 10%~25%,这使得磷素在土壤中大量积累,进而造成地下水污染等环境问题^[8-9]。因此,合理施用磷肥,提高磷肥利用率成为当前亟待解决的问题。

海藻肥是一种含有氨基酸、蛋白质、维生素等多种有机活性物质的新型有机肥,并富含陆生植物所不具有的海藻多糖、海藻酸盐、甘露醇等物质^[10-11]。海藻肥作为一种增效剂和土壤调理剂已逐渐用于农业生产中,具有促进作物营养吸收、生长发育、增强抗逆性等特点^[10,12]。研究发现施用海藻肥能够有效提高番茄种子的发芽率、促进幼苗生长发育,并能在缺铁环境下提高番茄的抗氧化系统活性^[13-14];崔丹丹等^[10]研究发现海藻提取物在干旱条件下能够显著提高菜心的叶绿素含量,增加氮磷钾的吸收,进而提高其经济产量和品质;王海标等^[15]和王修康等^[16]研究表明施用海藻酸复合肥后玉米的产量以及氮磷钾的养分积累均得到了显著增加。

海藻肥中养分含量较低,作为肥料直接施用效果不佳,一般多作为活性物质与氮磷钾等肥料配施^[10,17]。目前对海藻肥或海藻提取物的研究多集中在农作物产量及其逆境环境下的生长发育^[18-20],

而关于海藻肥对玉米生长发育及其磷肥利用率的研究较少。本研究在陕西杨凌进行田间试验,探明海藻酸复合磷肥对玉米产量、营养元素含量及其磷肥利用率的影响,旨在提高磷肥吸收利用效率及玉米科学施用海藻酸复合磷肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验分别于 2019—2020 年的 6~10 月在陕西省咸阳市杨陵区西北农林科技大学北校区试验田(34.30°N, 108.07°E)进行。该地区属暖温带半湿润半干旱气候,年均气温 12.9℃,年均降雨量 635.1 mm,年均日照时数 2 163.8 h,无霜期 211 d,种植期间的气温与降雨量详见图 1,当地耕作方式为单作一熟制。供试土壤类型为壤土,其基本理化性质为 pH 值 8.49(土水比 1:2.5),碱解氮 32.10 mg·kg⁻¹、有效磷 6.20 mg·kg⁻¹、速效钾 100.69 mg·kg⁻¹、全氮 0.94 g·kg⁻¹、全磷 0.78 g·kg⁻¹、全钾 18.38 g·kg⁻¹。

供试玉米品种为‘郑单 958’,生育期 103 d。供试肥料为尿素(N 46.0%,鲁西化工生产)、磷酸二铵(N 18.0%、P₂O₅ 46%,云南云天化股份有限公司生产)、海藻酸复合磷肥(烟台五洲丰农业科技有限公司生产,养分含量 N:P₂O₅:K₂O 为 14:28:0,海藻提取物含量为 2.5%;其中海藻酸提取物采用先进的固体发酵细胞壁自溶技术,避免了以往强酸强碱对海藻活性物质的破坏,能最大程度保留活性物质的天然成份及生物活性,经二级浓缩后,海藻酸含量高达 29.2%^[16])。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,包括不施磷肥(CK)、磷肥选用磷酸二铵(DAP)、磷肥选用海藻酸复合磷肥等磷量替代磷酸二铵(NI)、磷肥选用海藻酸复合磷肥

等质量替代磷酸二铵(相当于减磷约39%)(MI),各处理重复3次,每个小区面积为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 。按照当地施肥 $\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O}$ 用量 $225 : 90 : 0\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 换算成各小区施肥量分别为 $0.810 : 0 : 0$ (CK)、 $0.810 : 0.324 : 0\text{ kg}$ (DAP、NI)和 $0.810 : 0.198 : 0\text{ kg}$ (MI)(各处理氮素用量相同,其中不同处理磷肥所含氮素定量计算后在氮肥(尿素)施肥

量中扣除;当地玉米种植习惯不施钾肥),60%的氮素(包含磷肥自身所含氮素及部分尿素)与全部磷肥混匀后作为底肥基施,分别在玉米的拔节期和吐丝期各追施20%氮素(尿素)。试验分别于2019年和2020年的6月初播种、10月初收获,供试作物为玉米,种植密度 $67\ 500\text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,种植的行距为60 cm、株距为25 cm。

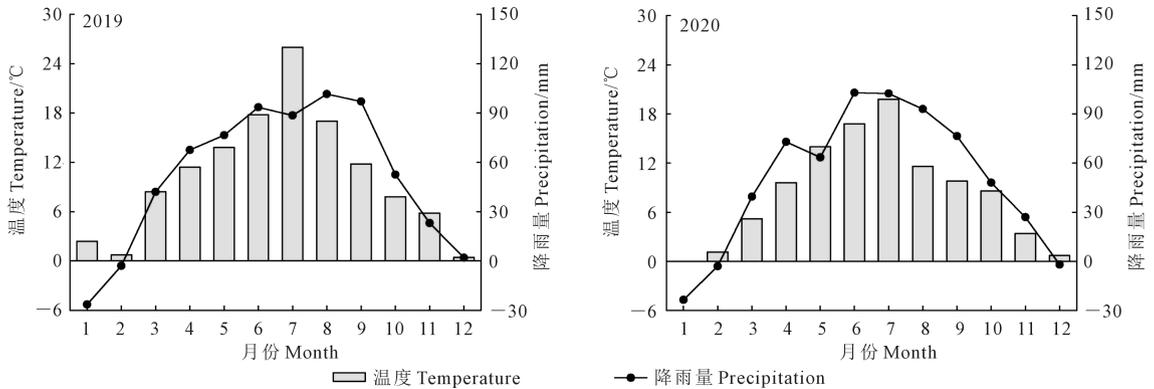


图1 试验地2019—2020年月平均气温和降雨量

Fig.1 Monthly average temperature and precipitation of the experimental site in 2019–2020

1.3 指标测定与方法

在2020年的玉米乳熟初期选取生长发育一致、叶片无病斑和破损的10株植株,用钢尺测定玉米株高,用游标卡尺在玉米基部扁面测定茎粗以及叶面积,叶面积=玉米最大长度 \times 最大宽度 $\times 0.75$,使用SPAD-502叶绿素仪(日本柯尼卡美能达公司)测定叶片叶绿素含量(SPAD)^[16]。在2019—2020年玉米收获时,每个小区随机选取3行玉米植株摘穗晒干后脱粒测产,并将玉米秸秆置于烘箱 105°C 杀青60 min, 65°C 烘干至恒重,测定植株生物量,并将2020年的玉米叶片、茎和籽粒分别使用植株磨样机磨细过筛测定植株氮、磷、钾养分含量。植株样品采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 联合消煮后,分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定全氮、全磷、全钾含量^[15,21–22]。

在2019—2020年的10月玉米收获时,对每个小区采用对角线5点取样法采集0~20 cm土壤样品,混合均匀后带回实验室自然风干,研磨分别过2 mm和0.25 mm筛。采用pH计测定(水土比为2.5:1)土壤酸碱度;分别采用碱解扩散法、 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法、醋酸铵浸提-火焰光度计法测定碱解氮、有效磷、速效钾;分别采用浓 H_2SO_4 消煮-凯氏定氮仪法、高氯酸消解-钼锑抗显色法、 HF-HClO_4 消煮-火焰光度计法测定土壤全氮、全磷、全钾含量^[12,21]。

磷肥农学效率($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=(施磷区籽粒产量-

不施磷区籽粒产量)/施磷量;

磷肥回收利用率(%)=(施磷处理磷素累积量-不施磷处理磷素累积量)/施磷量 $\times 100\%$;

磷肥偏生产力($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)=施磷肥区玉米产量/施磷量;

磷肥贡献率(%)=(施磷肥区作物产量-不施磷肥区作物产量)/施磷肥区作物产量 $\times 100\%$ ^[6,8,23]。

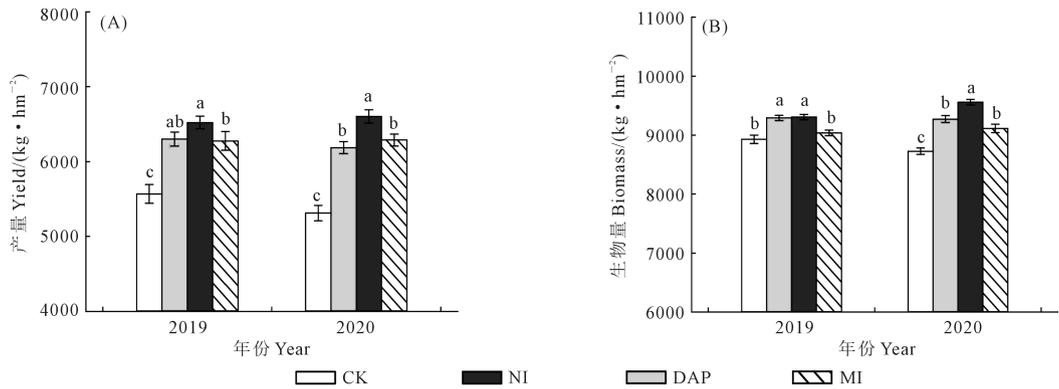
1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010和SAS 8.2进行数据统计与分析,不同处理间采用Duncan's多重检验方法进行显著性检验,采用SigmaPlot 12.5进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米产量的影响

不同处理对玉米产量和地上部生物量产生显著影响(图2),2019年和2020年中DAP处理较CK处理分别显著增加了13.2%和16.5%;MI处理较CK处理2 a间显著增加了12.7%~18.4%;MI与DAP处理无显著差异。NI处理玉米产量最高,在2019年较CK和MI处理显著提高了3.9%~17.1%,在2020年较DAP和MI处理分别显著提高了6.7%和5.0%。2019年中NI处理玉米生物量较CK和MI处理得到了显著增加,而与DAP处理无显著差异,在2020年较CK、DAP、MI处理分别显著增加了9.5%、3.3%、4.9%,MI与DAP处理在2020年无显著差异。



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$.

图 2 不同处理的玉米产量和生物量

Fig.2 Yield and biomass of maize under different treatments

2.2 不同处理对玉米农艺性状的影响

不同处理对 2020 年玉米乳熟初期的株高、茎粗、叶面积与 SPAD 值具有显著影响(表 1)。CK 处理玉米株高最低,较其他处理显著降低了 7.3%~9.1%,DAP、MI、NI 处理间无显著差异。NI 处理玉米茎粗较 CK、DAP、MI 处理显著增加了 10.4%~29.0%。对于玉米叶面积,DAP 与 CK 处理间无显著差异,NI 较 CK 与 MI 处理分别显著增加了 5.9%~6.9%,而与 DAP 处理无显著差异。NI 处理的叶片 SPAD 值较 CK、DAP 处理显著增加了 15.1%~27.8%,MI 较 DAP 处理显著增加了 15.1%,且 NI 与 MI 处理间的 SPAD 值无显著差异。

2.3 不同处理对土壤养分的影响

不同处理与不同年份分别对土壤碱解氮、全磷含量影响显著,且不同处理与年份对土壤全氮、有效磷、全磷含量具有显著的交互效应($P<0.05$,表 2)。NI 处理的土壤碱解氮含量较 CK 处理在 2019 年和 2020 年间分别显著增加了 41.7%和 12.4%,在 2019 年较 DAP 处理显著增加了 22.6%。NI 处理的土壤有效磷在 2019 年较 CK、DAP、MI 处理显著增加了 13.7%~30.9%,在 2020 年显著增加了 11.8%~59.9%,而 MI 与 DAP 处理间无显著差异。对于土壤全磷,在 2019 年 DAP、MI、NI 处理较 CK 处理显著增加了 19.4%~34.3%,但三者间无显著差异,在 2020 年 NI 处理较 MI 处理显著增加了 16.9%,而 MI 与 DAP 处理无显著差异。不同处理的土壤 pH、速效钾、全氮、全钾含量在 2 a 间均无显著差异。

2.4 不同处理对植株氮、磷、钾含量的影响

2020 年,不同处理对玉米不同器官的氮、磷、钾含量影响存在差异(表 3)。在玉米叶片中,NI 处理的全氮含量较 CK 处理显著增加了 17.9%,与 DAP 和 MI 处理无显著差异;全磷含量较 DAP 和 CK 处

表 1 不同处理的玉米农艺性状(2020 年)

Table 1 Agronomic traits of maize under different treatments (2020)

处理 Treatment	株高/m Plant height	茎粗/cm Stem diameter	叶面积/cm ² Leaf area	SPAD 值 SPAD value
CK	1.79b	1.72c	675.14bc	45.13c
DAP	1.93a	2.01b	697.11ab	50.13b
NI	1.96a	2.22a	714.91a	57.68a
MI	1.97a	1.98b	668.87c	55.19a

注:同列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 within each column mean significant difference at $P<0.05$. The same below.

理分别显著增加了 23.4%和 66.1%,全钾含量较 CK 处理显著增加了 44.9%。在玉米茎中,与 CK 处理相比,NI 处理植株全氮与全磷含量均得到了显著增加,而 DAP、MI、NI 处理间的氮、磷、钾含量无显著差异。NI 处理籽粒的全磷含量较 CK 显著增加了 57.0%,与 DAP 无显著差异;全氮与全钾含量与 CK 和 DAP 处理无显著差异。

2.5 不同处理对玉米磷素利用效率的影响

从表 4 可以看出,在 2020 年,不同施用磷肥处理的磷肥偏生产力不同,其中 MI 处理最高,较 NI 和 DAP 处理分别显著增加了 56.4%和 66.9%;MI 处理的磷肥农学效率较 NI 处理显著增加了 24.2%,NI 处理较 DAP 处理显著增加了 47.5%;不同处理的磷肥回收利用率表现为 NI>MI>DAP,NI 处理较 MI 和 DAP 处理分别显著增加了 5.26 和 15.65 个百分点,NI 处理的磷肥贡献率较 MI 和 DAP 处理显著增加了 4.02 和 5.99 个百分点,然而 DAP 与 MI 处理无显著差异。

2.6 相关性分析

通过对 2020 年的玉米产量、成熟期的生长特征与土壤理化性质的相关性分析发现(表 5),产量与

表2 不同处理的土壤养分含量

Table 2 Soil nutrient content under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	pH	碱解氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)
2019	CK	8.09a	27.07c	5.83c	100.20a	1.04a	0.67b	15.22a
	DAP	8.00a	31.27bc	6.51bc	95.43a	1.17a	0.90a	16.12a
	NI	8.21a	38.35a	7.63a	98.45a	0.96a	0.80a	16.14a
	MI	8.44a	34.30ab	6.71b	101.33a	1.05a	0.85a	16.27a
2020	CK	8.29a	37.80b	5.09c	96.70a	1.08a	0.68c	16.35a
	DAP	8.09a	38.50ab	7.15b	98.43a	0.98a	0.93ab	15.64a
	NI	8.39a	42.47a	8.14a	96.40a	1.13a	0.97a	16.21a
	MI	8.45a	40.60ab	7.28b	97.00a	1.10a	0.83b	16.04a
P 值 P value	处理 Treatment	0.4400	0.0082	<0.0001	0.9304	0.7771	<0.0001	0.6507
	年份 Year	0.5000	0.0004	0.1308	0.5337	0.5670	0.0476	0.6508
	年份×处理 Treatment×Year	0.9754	0.3345	0.0275	0.7666	0.0064	0.0321	0.2151

注:在相同年份下同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within each column of the same year mean significant difference at $P<0.05$.

表3 不同处理的植株氮、磷、钾含量(2020年)

Table 3 Nitrogen, phosphorus and potassium content of plant under different treatments (2020)

植株部位 Plant parts	处理 Treatment	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)
叶片 Leaf	CK	9.41b	3.30c	5.66b
	DAP	9.89ab	4.44b	8.35a
	NI	11.09a	5.48a	8.20a
	MI	10.29ab	4.68ab	7.59a
茎 Stem	CK	8.32b	2.50b	5.47a
	DAP	9.33ab	4.62a	6.80a
	NI	10.01a	4.91a	7.19a
	MI	9.20ab	3.37ab	5.62a
籽粒 Grain	CK	8.83a	2.91b	3.95b
	DAP	9.79a	3.54ab	4.67ab
	NI	10.11a	4.57a	5.27ab
	MI	8.57a	3.73ab	5.69a

土壤中的有效磷和全磷含量呈极显著正相关($P<0.01$);玉米株高与有效磷呈极显著正相关($P<0.01$),与全磷呈显著相关($P<0.05$);茎粗与有效磷和全磷含量极显著正相关($P<0.01$),叶面积与全磷显著正相关($P<0.05$),玉米叶片的SPAD值与碱解氮、全磷含量呈显著正相关($P<0.05$),与有效磷含量极显著正相关($P<0.01$)。整体表明土壤有效磷、全磷含量的提升可显著促进玉米的生长发育与产量的提升。

2.7 不同处理对玉米经济效益的影响

由表6可知,各处理每公顷玉米产出的经济收入在2019年表现为NI>DAP>MI>CK,而在2020年则表现为NI>MI>DAP>CK。充足的磷肥供应是玉米产量的有效保障,在施入海藻酸复合磷肥的第一年NI处理的纯收入较CK增加了19.5%,但仅比DAP

表4 不同处理玉米磷素当季利用效率(2020年)

Table 4 Phosphorus utilization efficiency of maize under different treatments in 2020

处理 Treatment	磷肥偏生产力 Partial factor productivity of phosphorus/(kg·kg ⁻¹)	磷肥农学效率 Phosphorus use efficiency of agriculture/(kg·kg ⁻¹)	磷肥回收利用率 Phosphorus use efficiency/%	磷肥贡献率 Contribution rate of phosphorus/%
DAP	68.73c	9.72c	11.64c	13.55b
NI	73.36b	14.34b	27.29a	19.54a
MI	114.74a	17.81a	22.03b	15.52b

表5 玉米产量、农艺性状与土壤理化性质间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis among yield, growth characteristics, and soil physical and chemical properties

指标 Index	产量 Yield	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	叶面积 Leaf area	SPAD值 SPAD value
pH	0.0702	0.0105	-0.0123	-0.2366	0.3308
碱解氮 Available N	0.4991	0.4119	0.4887	0.3891	0.6400*
有效磷 Available P	0.9360**	0.7406**	0.8931**	0.5241	0.8987**
速效钾 Available K	0.0430	0.0200	-0.0201	0.1473	-0.0465
全氮 Total N	0.0795	0.2010	0.1322	-0.0655	0.4334
全磷 Total P	0.8816**	0.6450*	0.8851**	0.6653*	0.6379*
全钾 Total K	-0.2047	-0.4052	-0.1329	-0.0833	-0.0186

注:*和**分别表示在0.05、0.01水平上显著相关。

Note: * and ** means significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

表 6 不同处理的玉米每公顷经济效益

Table 6 Economic benefits per hectare in maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	玉米产值/元 Maize cost	肥料价格/元 Compound fertilizer cost			其他费用/元 Other cost	纯收入/元 Net profit	较 DAP 增收/% Increment vs. DAP
			尿素 Urea	磷酸二铵 Diammonium phosphate	海藻酸复合磷肥 Alginate compound phosphate fertilizer			
2019	CK	13919.7	733.7	0	0	6000	7186.0	-16.3
	DAP	15753.0	618.8	548.0	0	6000	8586.3	0
	NI	16303.0	587.0	0	964.2	6000	8751.9	1.9
	MI	15690.0	644.3	0	587.1	6000	8458.7	-1.5
2020	CK	13279.3	733.7	0	0	6000	6545.7	-21.1
	DAP	15465.3	618.8	548.0	0	6000	8298.6	0
	NI	16506.7	587.0	0	964.2	6000	8955.5	7.9
	MI	15719.7	644.3	0	587.1	6000	8488.3	2.3

注:根据市场平均价格计算,玉米 2 500 元·t⁻¹;尿素 1 500 元·t⁻¹;磷酸二铵 2 800 元·t⁻¹;海藻酸复合磷肥 3 000 元·t⁻¹;其他费用包括种子、农药、灌溉、租地等,共计 6 000 元·hm⁻²。

Note: According the average price of market, the price of maize was 2 500 Yuan·t⁻¹; the price of urea, diammonium phosphate, alginate compound phosphate fertilizer were 1 500, 2 800, 3 000 Yuan·t⁻¹, respectively; and the price of other costs, containing seeding, pesticides, irrigation, land renting, were 6 000 Yuan·hm⁻².

处理增加了 1.9%;而在 2020 年,NI 处理较 DAP 增加了 7.9%,MI 较 DAP 增加了 2.3%。由此可见,随着时间的延长海藻酸复合磷肥玉米的经济效益增加显著。

3 讨论

磷作为玉米生长发育过程中必需的大量营养元素,与其产量息息相关。研究发现,施用磷肥后能够显著增加玉米的百粒重与穗粒数,进而显著提高产量^[24]。本研究中,施用磷肥处理较未施磷肥处理在 2 a 间产量显著增加了 12.7%~24.3%,并且施用磷肥较未施磷肥的叶片 SPAD 值显著增加了 11.1%~27.8%。这主要是因为磷素是核酸和细胞膜的主要组分,在植株的光合作用和能量代谢中起着重要的光反应作用;在缺磷的玉米植株中,主穗以下叶片的最终叶面积可减少 18%~27%,并且磷的缺乏还会影响到碳水化合物的代谢,从而影响光合作用和植物生长^[25]。施用磷肥可显著增加土壤中的有效磷和全磷含量,且土壤全磷在施磷第二年较第一年得到了显著提高,进而促进了植株对磷素的吸收,使得玉米茎和叶中的全磷含量显著增加。相关性分析表明,土壤有效磷的增加可显著促进玉米产量、株高、茎粗、叶面积和 SPAD 值的增加,全磷可显著促进产量和株高的增加。

磷肥在施入石灰性土壤时容易被碳酸钙等矿物吸附以及与 Ca²⁺、Mg²⁺ 发生沉淀反应进而降低其有效性^[6,8]。海藻肥中含有丰富的活性物质、酶以及微生物^[11],可以显著提高土壤酶和微生物活性,进而提高土壤有效养分的含量,达到增产效果^[26-27]。在本试验中,施用海藻酸复合磷肥使得土

壤有效磷含量较普通磷肥处理显著增加了 13.8%~17.2%,在海藻酸复合磷肥磷素含量减少约 40%的情况下依然与普通磷肥处理的有效磷含量无显著差异。这主要是因为海藻酸能够显著促进植物的根系生长,刺激玉米根系分泌有机酸,进而提高土壤中的有效磷含量,并且本研究发现海藻酸复合磷肥的施用还显著增加了土壤中的碱解氮含量,这与张蕊等^[28]研究相似,可能是因为海藻酸除了活化土壤养分的同时,自身具有还原性,能够显著降低尿素转化硝酸盐的速率,并且海藻酸具有较强的吸附性,可有效的将黏土矿物聚集起来进而避免养分的径流损失,具有保持和改善土壤养分的作用^[12,29]。

海藻酸提取物中含有海藻酸、甜菜碱、海藻多糖、植物激素等多种有机物质,具有一定的增产增效作用^[15,30]。研究发现,在干旱条件下的海藻酸提取物与氮磷钾配施可显著提高菜心的品质与产量^[10];作为叶面肥喷施或与其他常规肥料拌匀后施入土壤中,均有利于提高作物产量^[12,31]。在本试验中,NI 处理较 CK 和 DAP 处理在 2020 年分别显著增产 24.3%和 6.7%,这与 Rathore 等^[31]和姜洁等^[32]的研究结果相似。海藻酸中的有益元素与活性物质可作为营养成分直接参与植物的生命活动,亦可作为植物刺激素参与调控植物的生理活性^[32]。本试验中,NI 与 MI 处理的玉米叶片 SPAD 显著增加,主要是海藻肥中的甜菜碱可有效减少叶绿素的分解,促进植物的光合作用^[16,30]。随着玉米的生长发育与土壤有效养分的增加,玉米叶片中的全磷含量也得到了显著增加,最终提高了产量及其经济效益。因此,施用海藻酸复合磷肥可以显著增加玉米的磷肥利用率和农学利用效率,提高磷肥对产量的

贡献率,然而海藻酸对土壤磷转化的促进机制仍需进一步研究。

4 结 论

NI 处理玉米产量在 2019 年较 CK 处理显著增加了 17.1%,在 2020 年较 CK 和 DAP 处理分别显著增加了 24.3%和 6.7%,磷肥利用率也得到了显著提高。NI 处理较 DAP 处理显著增加了玉米的株高和 SPAD 值及叶片中的全磷含量。对于土壤有效磷,NI 处理在 2 a 间较 CK 和 DAP 处理分别显著增加了 30.9%~59.9%和 13.8%~17.2%,然而 MI 与 DAP 处理间差异不显著。综上,海藻酸复合磷肥等磷量替代磷酸二铵可显著提高土壤有效磷的供应强度,有利于促进玉米的生长发育并提高产量。

参 考 文 献:

- [1] 吴良泉,武良,崔振岭,等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817.
WU L Q, WU L, CUI Z L, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4): 802-817.
- [2] 郭大勇,袁玉玉,曾祥,等. 石灰性土壤施用不同磷肥对玉米苗期生长和土壤无机磷组分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 243-249.
GUO D Y, YUAN Y Y, ZENG X, et al. Effect of phosphorus fertilizer on maize growth and inorganic phosphorus fractions in a calcareous soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 243-249.
- [3] HAN Y, HONG W T, XIONG C Y, et al. Combining analyses of metabolite profiles and phosphorus fractions to explore high phosphorus utilization efficiency in maize[J]. Journal of Experimental Botany, 2022, 73(12): 4184-4203.
- [4] BATTINI F, GRÖNLUND M, AGNOLUCCI M, et al. Facilitation of phosphorus uptake in maize plants by mycorrhizosphere bacteria[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 4686.
- [5] 都江雪,韩天富,曲潇林,等. 中国主要粮食作物磷肥偏生产力时空演变特征及驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 191-204.
DU J X, HAN T F, QU X L, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of partial phosphorus productivity in major grain crops in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(2): 191-204.
- [6] 单旭东,石琳,田帅,等. 玉米秸秆还田后磷肥减量对冬小麦磷素积累量和产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 884-892.
SHAN X D, SHI L, TIAN S, et al. Effects of phosphate fertilizer reduction on phosphorus accumulation and yield of winter wheat after maize straw returning[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(4): 884-892.
- [7] RAMOS-ARTUSO F, GALATRO A, BUET A, et al. Key acclimation responses to phosphorus deficiency in maize plants are influenced by exogenous nitric oxide[J]. Journal of Plant Physiology, 2018, 222: 51-58.
- [8] 陈琪,刘之广,张民,等. 包膜磷酸二铵配施黄腐酸提高小麦产量及土壤养分供应强度[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1472-1484.
CHEN Q, LIU Z G, ZHANG M, et al. Effects of application of coated diammonium phosphate in combination with fulvic acid improving wheat

- yield and soil nutrient supply intensity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(6): 1472-1484.
- [9] LI H G, LIU J, LI G H, et al. Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses[J]. Ambio, 2015, 44(S2): S274-S285.
- [10] 崔丹丹,杨锦,耿银银,等. 海藻肥对菜心抗旱性的影响及其机理探究[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(7): 1185-1197.
CUI D D, YANG J, GENG Y Y, et al. Effect and mechanism of seaweed fertilizer increasing the drought stress resistance of flowering Chinese cabbage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(7): 1185-1197.
- [11] ZHOU G X, QIU X W, ZHANG J B, et al. Effects of seaweed fertilizer on enzyme activities, metabolic characteristics, and bacterial communities during maize straw composting [J]. Bioresource Technology, 2019, 286: 121375.
- [12] 王伟涛,孟庆敏,高丽超,等. 海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米产量及土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 280-288.
WANG W T, MENG Q M, GAO L C, et al. Effects of combined application of alginic acid and controlled-release urea on yield of wheat and maize, and soil nutrient [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 280-288.
- [13] HERNÁNDEZ-HERRERA R M, SANTACRUZ-RUVALCABA F, RUIZ-LÓPEZ M A, et al. Effect of liquid seaweed extracts on growth of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(1): 619-628.
- [14] CARRASCO-GIL S, HERNANDEZ-APAOLAZA L, LUCENA J J. Effect of several commercial seaweed extracts in the mitigation of iron chlorosis of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Plant Growth Regulation, 2018, 86(3): 401-411.
- [15] 王海标,张博,陶静静,等. 海藻酸复混肥对夏玉米产量及养分吸收利用的影响[J]. 农学报, 2017, 7(10): 25-29.
WANG H B, ZHANG B, TAO J J, et al. Alginic acid compound fertilizer: effects on yield and nutrient absorption and utilization of summer maize[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(10): 25-29.
- [16] 王修康,马金昭,孙瑶,等. 新型海藻肥对玉米生长发育及其产量的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 524-531.
WANG X K, MA J Z, SUN Y, et al. Effect of a novel seaweed fertilizer on the growth and yield of maize[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(3): 524-531.
- [17] 杨锦,尹媛红,沈宏. 海藻功能物质对菜心抗旱胁迫的影响[J]. 磷肥与复肥, 2019, 34(3): 34-42.
YANG J, YIN Y H, SHEN H. Effect of seaweed functional substances on drought resistance of flowering cabbage[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2019, 34(3): 34-42.
- [18] SHUKLA P S, SHOTTON K, NORMAN E, et al. Seaweed extract improve drought tolerance of soybean by regulating stress-response genes [J]. AoB Plants, 2018, 10(1): plx051.
- [19] ALMAROAI Y A, EISSA M A. Role of marine algae extracts in water stress resistance of onion under semiarid conditions[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 20(3): 1092-1101.
- [20] 王旭承,王婷,王梦娇,等. 海藻肥对低温胁迫下铁皮石斛抗氧化能力及相关基因表达的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (1): 194-201.
WANG X C, WANG T, WANG M J, et al. Effects of seaweed fertilizer on antioxidant capacity and related gene expression of *Dendrobium officinale* under low-temperature stress [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (1): 194-201.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263-271.

- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 263-271.
- [22] 逢娜, 程松, 李兴吉, 等. 秸秆全量还田条件下玉米磷素吸收特征与磷肥适宜用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(5): 812-822.
- PANG N, CHENG S, LI X J, et al. Phosphorus accumulation characteristics and suitable phosphorus application rate of maize under full straw returning[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(5): 812-822.
- [23] 杨梦隼, 赵萍萍, 于志勇, 等. 晋南地区小麦-玉米轮作体系维持作物高产和土壤磷素水平的适宜施磷量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(3): 440-449.
- YANG M D, ZHAO P P, YU Z Y, et al. Optimum phosphorus application rate for maintaining high yield and soil phosphorus fertility under winter wheat-summer maize rotation in Shanxi Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(3): 440-449.
- [24] KUMAR A, KUMAR M. Effect of different levels of phosphorus on the yield and yield components of maize under agro-climatic zone-II of Bihar [J]. International Journal of Agricultural Sciences, 2017, 13(2): 266-270.
- [25] TIMLIN D J, NAIDU T C M, FLEISHER D H, et al. Quantitative effects of phosphorus on maize canopy photosynthesis and biomass[J]. Crop Science, 2017, 57(6): 3156-3169.
- [26] BATTACHARYYA D, BABGOHARI M Z, RATHOR P, et al. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 196: 39-48.
- [27] ARIOLI T, MATTNER S W, WINBERG P C. Applications of seaweed extracts in Australian agriculture: past, present and future[J]. Journal of Applied Phycology, 2015, 27(5): 2007-2015.
- [28] 张蕊, 王钰馨, 赵雪惠, 等. 海藻有机肥不同施用量对土壤肥力及‘肥城’桃品质的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1819-1828.
- ZHANG R, WANG Y X, ZHAO X H, et al. Effects of different seaweed fertilizer levels on soil fertility and fruit quality of ‘Feicheng’ peach[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(12): 1819-1828.
- [29] WEI L, HONG T Q, CHEN T H, et al. Factors influencing inhibitory effect of alginate acid on the growth rate of struvite crystals[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2019, 230(1): 10.
- [30] 何锐, 谭星, 高美芳, 等. 添加不同浓度海藻肥对水培芥蓝生长及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2051-2059.
- HE R, TAN X, GAO M F, et al. Effects of different concentrations of seaweed extract on growth and quality of Chinese kale in hydroponics [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(11): 2051-2059.
- [31] RATHORE S S, CHAUDHARY D R, BORICHA G N, et al. Effect of seaweed extract on the growth, yield and nutrient uptake of soybean (*Glycine max*) under rainfed conditions[J]. South African Journal of Botany, 2009, 75(2): 351-355.
- [32] 姜洁, 龚一富, 郭蓉, 等. 海藻生物肥对草莓产量和品质的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(5): 1032-1037.
- JIANG J, GONG Y F, GUO R, et al. Effect of seaweed bio-fertilizer on the yield and quality of strawberry[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(5): 1032-1037.
- (上接第 106 页)
- [27] 耿石英, 孙华林, 王小燕, 等. 不同氮肥处理下小麦冠层和叶片光谱特征及产量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(11): 3534-3540.
- GENG S Y, SUN H L, WANG X Y, et al. Relationships between characteristics of wheat canopy and leaf spectral reflectance and yield under different nitrogen treatments[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(11): 3534-3540.
- [28] 李广信, 王超, 冯美臣, 等. 冬小麦冠层光谱与土壤供氮状况相关性研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 275-281.
- LI G X, WANG C, FENG M C, et al. Correlation between soil nitrogen situation and canopy spectra of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 275-281.
- [29] 王颖, 姜运生, 石一凡, 等. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5099-5108.
- WANG Y, LOU Y S, SHI Y F, et al. Methane emission in response to nighttime warming and its hyperspectral estimation in a paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5099-5108.
- [30] WANG Y H, SONG C, LIU H Y, et al. Precipitation determines the magnitude and direction of interannual responses of soil respiration to experimental warming[J]. Plant and soil, 2021, 458(1): 75-91.
- [31] 骆亦其, 周旭辉. 土壤呼吸与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 146-152.
- LUO Y Q, ZHOU X H. Soil respiration and the environment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 146-152.
- [32] 郑恩楠, 朱银浩, 胡建宇, 等. 水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 272-279.
- ZHENG E N, ZHU Y H, HU J Y, et al. Coupling of water and fertilizer methods on growth of rice, soil respiration and inorganic nitrogen [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 272-279.
- [33] 刘春霞, 王玉杰, 王云琦, 等. 重庆缙云山 3 种林型土壤呼吸及其影响因子[J]. 土壤通报, 2013, 44(3): 587-593.
- LIU C X, WANG Y J, WANG Y Q, et al. Soil respiration and impact factors of 3 forest types in Jinyun Mountain of Chongqing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(3): 587-593.
- [34] BALDOCCHI D, CHU H S, REICHSTEIN M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: a review[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 520-533.
- [35] 王富贵, 于林清, 田自华, 等. 18 个苜蓿品种根系特征及与地上生物量关系的研究[J]. 中国草地学报, 2011, 33(4): 51-57.
- WANG F G, YU L Q, TIAN Z H, et al. Root characteristics and the relationship with yield of 18 alfalfa cultivars [J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(4): 51-57.
- [36] 程慎玉, 张尧洲. 土壤呼吸中根系与微生物呼吸的区分方法与应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 597-602.
- CHENG S Y, ZHANG X Z. A review on differential methods for root and soil microbial contributions to total soil respiration[J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(4): 597-602.
- [37] YAO X W, CHEN S T, DING S C, et al. Temperature, moisture, hyperspectral vegetation indexes, and leaf traits regulated soil respiration in different crop planting fields[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(4): 3203-3220.
- [38] 彭燕, 何国金, 张兆明, 等. 中国区域 Landsat 遥感指数产品[J]. 中国科学数据, 2020, 5(4): 83-90.
- PENG Y, HE G J, ZHANG Z M, et al. Landsat spectral index products over China[J]. China Scientific Data, 2020, 5(4): 83-90.