

磷对胡麻籽粒蛋白质和钾、钙、钠、镁含量的影响

谢亚萍^{1,2}, 王利民¹, 齐燕妮¹, 李闻娟¹, 党照¹, 赵玮¹, 张建平^{1*}, 王兴珍¹, 崔政军³

(1. 甘肃省农业科学院作物研究所, 甘肃 兰州, 730070;

2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州, 730070;

3. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州, 730070)

摘要:探究不同施磷量对胡麻籽粒蛋白质和金属元素含量的影响,为构建磷肥高效管理提供依据。通过2018和2019年连续2年大田试验,设置5个施磷水平(0、40、80、120、160 kg P₂O₅·hm⁻²),3个品种(陇亚杂1号、陇亚14号和张亚2号)两因素随机区组试验,研究不同磷水平对胡麻籽粒产量、籽粒蛋白质、钾、钙、钠、镁含量的作用效果。结果表明,随施磷量增加,胡麻籽粒产量、籽粒钾、钙、镁含量不同程度增加;相比不施磷,施磷处理籽粒产量、籽粒钾、钙、镁含量,分别平均提高17.6%、11.6%、17.6%和12.5%;籽粒蛋白质和钠含量不受磷影响。综合考虑胡麻籽粒产量、籽粒钾、钙、镁含量和生态环境,该区域施磷80 kg P₂O₅·hm⁻²较佳,可协同增加胡麻籽粒产量及籽粒钙、镁含量;降低环境风险,减少碳排放。

关键词:胡麻籽;磷;蛋白质;钾;钙;钠;镁

中图分类号:S565.906

文献标识码:A

文章编号:1007-9084(2023)05-1034-08

Effect of phosphorus on protein, potassium, calcium, sodium, magnesium contents of flaxseed

XIE Ya-ping^{1,2}, WANG Li-min¹, QI Yan-ni¹, LI Wen-juan¹, DANG Zhao¹, ZHAO Wei¹, ZHANG Jian-ping^{1*},
WANG Xing-zhen¹, CUI Zheng-jun³

(1. Crop Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Key Lab of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To explore phosphorus (P) rate effect on protein and metal content of flaxseed, and to provide a basis for establishment high efficient P fertilizer management, field experiments were conducted in 2018 and 2019 with 2 factors randomized block by 5 P levels (0, 40, 80, 120, 160 kg P₂O₅·hm⁻²) for 3 cultivars (Longyaza 1, Longya 14 and Zhangya 2). Seed protein, potassium, calcium, sodium and magnesium contents of flaxseed were investigated. Results showed that flaxseed yield, seed potassium, calcium and magnesium contents improved in different degrees with P application rate. Compared with no P, average seed yield, seed potassium, calcium and magnesium contents increased 17.6%, 11.6%, 17.6% and 12.5% respectively. Phosphorus did not affect seed sodium and protein contents. Considering yield, seed potassium, calcium and magnesium contents between years, P rate of 80 kg P₂O₅·hm⁻² was the most appropriate, which synergistically increased yield, flaxseed calcium and magnesium contents, and also reduced environmental risks by excess P fertilizer.

Key words: flaxseed; phosphorus; protein; potassium; calcium; sodium; magnesium

胡麻(*Linum usitatissimum* L.)是我国一种重要的油料作物及工业原料^[1]。胡麻籽富含木酚素、亚

麻酸、蛋白质和矿物质^[1,2],经常食用可以降低心血管、糖尿病、关节炎、乳腺癌等疾病的发生^[1]。因此,

收稿日期:2022-05-09

基金项目:甘肃省农科院农业科技创新项目(2021GAAS20、2019GAAS32、2020GAAS08);国家自然科学基金(31660368、32060437);国家特色油料产业技术体系(MOF和MARA);甘肃省科技重大专项项目(21ZD4NA022-02)

作者简介:谢亚萍(1976-),女,副研究员,硕士生导师,主要从事作物高产高效栽培与生态生理研究,E-mail: xieyp2012@126.com

* 通讯作者:张建平(1972-),男,研究员,硕士生导师,主要从事胡麻育种及推广研究,E-mail: 401101917@qq.com

人们对胡麻籽的需求日益增长。伴随需求的增加,我国成为世界第一大胡麻籽进口国^[3]。据世界粮农组织统计数据表明,从2010年到2019年,虽然我国胡麻单产增加20%,但是收获面积和总产量分别减少20%和4%^[4],和发达国家相比,差距较大,胡麻生产依然面临着巨大挑战。

磷是植物生长发育必需营养元素,胡麻是需磷多的油料作物。在生产中,基于提高产量和经济效益的目的,过量施磷较普遍,对环境造成危害^[5]。数据表明,从2010年到2019年,全世界施用磷肥多的国家依次是:中国、印度、巴西、美国、巴基斯坦、加拿大、澳大利亚^[6]。与此同时,从2010年到2019年,我国农用磷肥(P_2O_5)供应量又在减少(平均减少28%)^[3]。因此,提高磷利用率就成为生产中亟待解决的问题。

钠、钙、钾、镁为人体生命活动所必需的常量元素^[7]。胡麻籽是一种很好的矿物质原料,尤其是钾、镁、钙、钠等金属元素含量丰富^[2]。课题组曾以坝选3号为材料,探究了施磷量对胡麻生长、磷的吸收、产量和构成因子及磷肥利用率的影响^[8];以轮选2号为材料,研究施磷量对胡麻干物质积累及磷素利用率的影响^[9];以陇亚杂1号为对象,研究施磷量对胡麻产量、油含量及脂肪酸组分的影响^[10],为胡麻的营养和品质提供了数据。关于磷肥对作物籽粒中金属元素的影响,在马铃薯^[11]、小麦^[12]、水稻^[13]、花生^[14]和油菜^[15]等粮油作物上已有研究,对胡麻籽粒金属元素含量的影响未见报道。

胡麻籽粒中蛋白质含量约占20%~30%^[16],在预防和治疗心脏病及增强免疫系统方面发挥着巨大作用^[1]。有关作物籽粒蛋白质含量对磷肥的响应,大豆^[17-19]上研究较多,但结论并不一致,其中,Abbasi等^[17]和Yin等^[18]研究发现,磷肥的施用使大豆籽粒蛋白质含量提高;而Krueger等^[19]指出,大豆籽粒蛋白质含量不受磷影响。Morshedi等^[20]研究表明,磷素对油菜籽粒蛋白质没有影响。课题组曾以陇亚杂1号为材料,发现成熟期胡麻籽粒蛋白质含量不受磷影响^[21]。

本研究以3个胡麻品种为对象,探讨不同施磷水平对胡麻籽粒产量,籽粒蛋白质、钾、钙、钠和镁含量的影响,旨在探索高效的磷肥管理措施,提高胡麻籽粒蛋白质和金属营养元素含量,为生产和研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验地概况

胡麻品种为陇亚杂1号、陇亚14号和张亚2号。前两个品种为甘肃省农业科学院作物研究所提供,张亚2号为张掖市农业科学研究院提供。

试验于2018和2019年3-8月在甘肃省兰州市永登县上川镇(103°40'E, 36°03'N)进行,试验田地处甘肃省中部,属大陆性气候,年平均气温为5.9℃,年均降温水量为290 mm,年日照时数为2659 h,平均无霜期121 d。前茬作物是小麦,播种前用拖拉机耨耙2次,播前0~30 cm耕层土壤理化性质分别是有机质 $9.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.82\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.79\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮 $38.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $30.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $10.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $8.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $178.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $141.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 7.5和8.2。

1.2 试验设计

试验采用二因素随机区组设计,设0、40、80、120和 $160\text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{hm}^{-2}$ (即 P_0 , P_{40} , P_{80} , P_{120} 和 P_{160})5个供磷水平,3个品种,15个处理,3次重复,共45个小区。基肥施纯N为 $45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。所施氮、磷、钾肥分别为尿素(含N 42%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和硫酸钾(含 K_2O 50%)。分别在现蕾期和花期追施氮肥 $15\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,结合灌水施入。试验小区面积 $20\text{ m}^2(4\text{ m}\times 5\text{ m})$,小区间和重复间分别留30 cm和50 cm宽的过道。种植密度 7.5×10^6 株/公顷,条播,播深3 cm,行距20 cm,其它管理方式参照当地胡麻田管理。

1.3 样品采集及试验指标测试

胡麻盛花期每个小区选取开花时间一致的植株进行标记,进入成熟期后,每个小区取样30株标记植株,收集籽粒。晾干后,从中选取饱满、无破损、无霉变的50 g籽粒粉碎过筛,混匀取0.25 g,样品用 HNO_3 加 H_2O_2 消解法预处理,采用电感耦合等离子体质谱仪测定籽粒中钾、钙、钠和镁含量^[22]。籽粒中蛋白质含量采用凯氏定氮法^[23],利用下面公式估算:蛋白质(%)= $6.25\times\text{N}(\%)$ ^[24]。

收获时按小区单打单收,晒干后称量测得小区产量。试验取样对小区产量所造成影响忽略未计。

1.4 数据分析与处理

采用SPSS22分析数据 Microsoft Excel 2010 绘制图。

2 结果与分析

2.1 磷对胡麻籽粒产量的影响

年份、磷肥、品种及年份与品种间互作显著影响胡麻籽粒产量(表1和2)。2018年胡麻籽粒产量平均1802.85 kg·hm⁻²,比2019年高18.2%。可能与2018年土壤有机质、硝态氮、速效磷和速效钾含量比2019年高有关。本试验中,随施磷量增加,产量先增加后略有降低(表2,图1A);相比不施磷,施磷40、80、120和160 kg P₂O₅·hm⁻²,籽粒产量分别平均提高10.0%、16.8%、17.6%和14.6%。但不施磷与施磷40之间,施磷80、120和160 kg P₂O₅·hm⁻²之间

差异不显著。以上数据表明,施磷80 kg P₂O₅·hm⁻²及以上时籽粒产量增加显著,为本地区较佳施磷量。3个品种产量差异显著,陇亚14号产量最高,分别比陇亚杂1号和张亚2号高14.5%和19.3%(图1B)。依据统计学交互分析结果,胡麻籽粒产量受年份与品种互作影响,两年间,品种间差异有所不同,2018年陇亚杂1号与张亚2号产量差异不显著,而2019年产量差异显著。

2.2 磷对籽粒蛋白质含量的影响

磷对胡麻籽粒蛋白质含量影响不显著。年份、年份与磷和年份与品种的互作影响着胡麻籽粒蛋

表1 试验中各个参数的方差分析

Table 1 Analysis of variance of variables in this study

参数 Parameter	年 Year (Y)	磷 P	品种 C	年×磷 Y×P	年×品种 Y×C	磷×品种 P×C	年×磷×品种 Y×P×C
产量 Seed yield	*	**	*	ns	*	ns	ns
钾含量 Potassium content	ns	*	ns	ns	**	ns	**
钙含量 Calcium content	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
钠含量 Sodium content	*	ns	**	ns	ns	ns	**
镁含量 Magnesium content	ns	*	ns	ns	ns	ns	**
蛋白质含量 Protein content	*	ns	ns	*	**	ns	ns

注:P、C分别代表磷和品种;*代表差异显著水平在0.05;**代表差异显著水平在0.01

Note: P and C indicated phosphorus and cultivar, respectively. * Significant at $P < 0.05$. ** Significant at $P < 0.01$

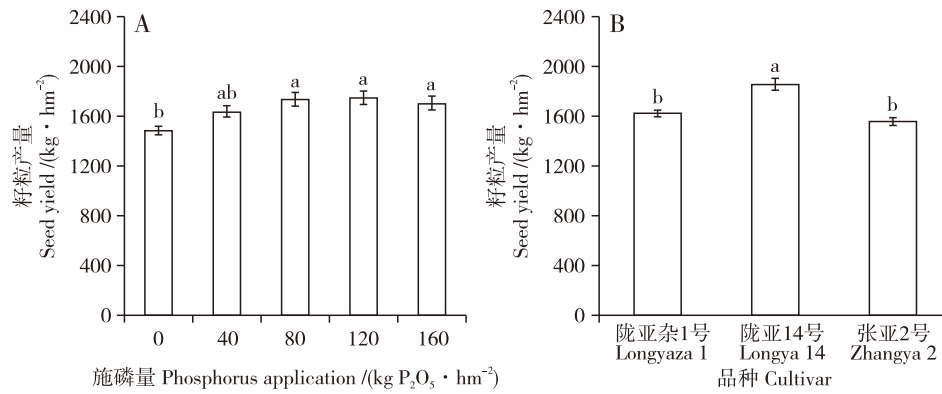
表2 不同磷水平对胡麻籽粒产量和籽粒蛋白质含量的影响

Table 2 Effect of different phosphorus level on the seed yield and seed protein content of flaxseed

品种与处理 Cultivar and treatments	产量 Seed yield /(kg·hm ⁻²)		蛋白质含量 Protein content /%	
	2018	2019	2018	2019
陇亚杂1号 Longyaza 1				
P ₀	1602±60e	1370±61d	23.5±0.3ab	20.3±0.1b
P ₄₀	1708±31cd	1467±82c	23.1±0.6b	21.2±0.5ab
P ₈₀	1752±39c	1563±79b	23.5±0.3ab	21.3 ±0.5ab
P ₁₂₀	1780±101c	1563±56b	23.7±0.5ab	20.4±1.1b
P ₁₆₀	1740±18c	1533±43b	23.8±0.4ab	21.2±0.1ab
陇亚14号 Longya 14				
P ₀	1681±47d	1443±30c	22.9±0.3b	21.0±0.3ab
P ₄₀	1946±56b	1687±43ab	22.9±0.6b	21.6±0.4ab
P ₈₀	2173±71a	1747±56a	23.0±0.5b	21.9±0.8ab
P ₁₂₀	2171±26a	1747±35a	23.1±0.7b	20.6±0.1b
P ₁₆₀	2100±94ab	1720±78a	23.4±0.1ab	21.0±0.4ab
张亚2号 Zhangya 2				
P ₀	1517±51e	1320±31d	23.8±0.4ab	22.6±0.4a
P ₄₀	1622±90d	1400±31cd	24.1±0.2ab	22.6±0.9a
P ₈₀	1731±57c	1463±65c	23.4±0.3ab	22.5±0.1a
P ₁₂₀	1759±63c	1483±33c	23.9±0.7ab	22.1±0.7ab
P ₁₆₀	1751±16c	1380±57d	24.7±0.3a	22.8±0.3a
平均 Mean	1802.85±61	1525.78±42	23.5±0.3	21.5±0.5

注:不同小写字母表示处理间差异显著水平为0.05;下同

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at 0.05; Same as below



注:不同小写字母表示差异显著水平为0.05;下同

Note: Different lowercase letters mean significant difference at 0.05; Same as below

图1 不同磷水平和不同品种对胡麻籽粒产量的影响

Fig. 1 Effect of different phosphorus level and different cultivar on seed yield of flaxseed

白质含量(表1和表2)。2018年籽粒蛋白质含量为 $23.5 \pm 0.3\%$,比2019年高出两个百分点。2018年,最低(23.3%)和最高(23.9%)籽粒蛋白质含量分别是在施磷量80和 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 下获得;2019年,最低(21.0%)和最高(21.9%)蛋白质含量分别是在120和 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 下观测到。可见,年份与磷的互作影响胡麻籽粒蛋白质含量。三个品种间,2018年陇亚14号籽粒蛋白质含量(23.1%)仅与张亚2号蛋白质含量(24.0%)间差异显著($P < 0.05$);2019年,陇亚14号籽粒蛋白质含量(21.2%)与张亚2号(22.5%)和陇亚杂1号(20.9%)蛋白质含量间差异显著($P < 0.05$)。不难看出,胡麻籽粒蛋白质含量受年份与品种互作影响。

2.3 磷对籽粒钾含量的影响

胡麻籽粒中钾的含量受施磷量,年份与品种及年份、磷和品种间互作影响(表1)。籽粒钾含量最高 $11\,443 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是陇亚14号2019年在 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时获得,最低含量 $7645 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是张亚2

号于2018年在不施磷时获得(表3)。随施磷增加,籽粒钾含量先升高后降低;相比不施磷,施磷40、80、120和 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$,籽粒钾含量分别平均提高5.1%、11.3%、11.6%和5.6%。图2A不难看出,施磷 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,钾含量显著提高。受年份与品种互作影响,2018年陇亚14号籽粒钾含量显著高于陇亚杂1号和张亚2号,且三个品种间差异显著($P < 0.05$);2019年陇亚杂1号和张亚2号间钾含量差异不显著($P > 0.05$)。

2.4 磷对籽粒钙含量的影响

磷显著影响胡麻籽粒钙含量(表1、表3)。籽粒钙含量随施磷量增加先升高后趋于稳定,最高钙含量 $2387 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 在 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 下获得,且施磷80、120和 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间籽粒钙含量差异不显著($P > 0.05$)(图2B)。不难看出,施磷 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 为籽粒钙含量提高的较佳用量,平均提高17.6%(图2B)。三个品种间,陇亚14号籽粒钙含量最高,为 $2382 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均比其它两个品种高

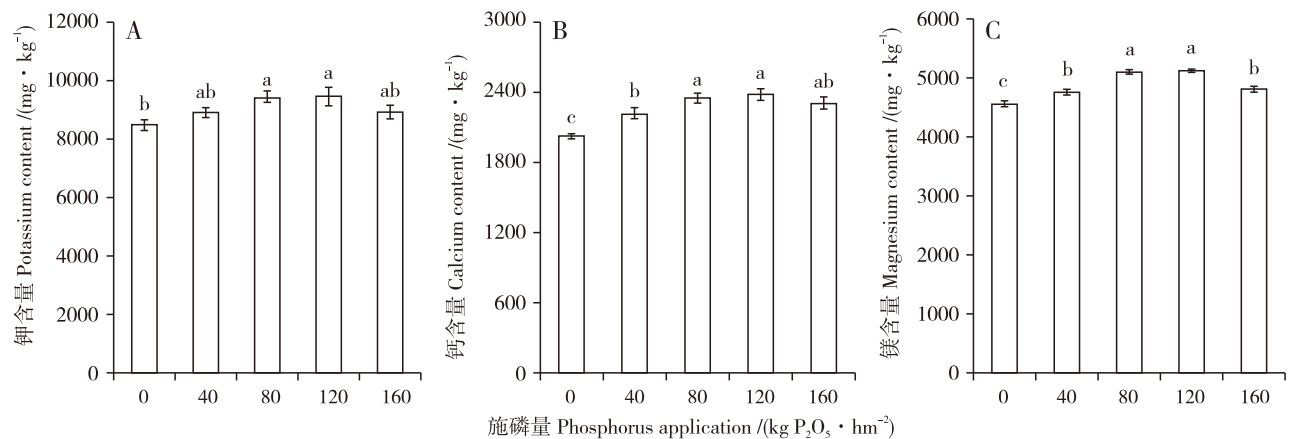


图2 不同磷水平对胡麻籽粒钾、钙和镁含量的影响

Fig. 2 Effect of different phosphorus level on potassium, calcium and magnesium of flaxseed

表3 不同磷水平对籽粒中钾、钙、钠和镁含量的影响

Table 3 Effect of different phosphorus levels on the potassium (K), calcium (Ca), sodium (Na) and magnesium (Mg) contents in flaxseed

处理 Treatments	钾含量 K content /(mg·kg ⁻¹)		钙含量 Ca content /(mg·kg ⁻¹)		钠含量 Na content /(mg·kg ⁻¹)		镁含量 Mg content /(mg·kg ⁻¹)	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
陇亚杂1号 Longyaza 1								
P ₀	8453±93f	7932±62i	2045±54f	1980±36d	675±9ab	831±2ab	4874±43bc	4303±58e
P ₄₀	8880±99e	8154±79ghi	2032±34f	2060±54cd	689±10a	795±2c	4876±73bc	4985±49bc
P ₈₀	9259±98cd	9245±90e	2304±48de	2165±100bcd	553±8ef	842±5ab	5092±77ab	5155±70ab
P ₁₂₀	9916±53b	8477±51g	2274±11de	2206±101bcd	623±6c	787±33c	5151±68a	5247±49a
P ₁₆₀	8968±57de	8377±59gh	2226±31e	1988±33d	617±11c	686±5g	4922±41abc	4560±81d
陇亚14号 Longya 14								
P ₀	8975±60de	9671±35d	2029±18f	2134±45bcd	460±6gh	625±5i	4621±68d	4561±35d
P ₄₀	9046±76de	10171±194c	2530±47abc	2246±97bcd	477±9g	823±4b	4877±43bc	4590±63d
P ₈₀	10024±31ab	10636±128b	2460±33bc	2382±110ab	448±7h	635±3i	5099±108ab	5033±99bc
P ₁₂₀	10300±354a	11443±317a	2626±68a	2541±86a	419±13i	613±3j	5139±56a	5031±74bc
P ₁₆₀	9569±66c	10563±84b	2533±22abc	2340±88ab	652±7b	588±4k	4976±117ab	4885±53c
张亚2号 Zhangya 2								
P ₀	7645±63i	7903±62i	2000±57f	1986±40d	599±10cd	708±4f	4620±42d	4335±65e
P ₄₀	8045±82gh	8870±113f	2320±41de	2152±77bcd	575±7de	734±3e	4702±64cd	4493±65de
P ₈₀	8044±71gh	9063±122ef	2549±30ab	2285±112abc	487±8g	718±2f	4913±66abc	5268±89a
P ₁₂₀	8321±70fg	7978±68i	2521±59abc	2322±110abc	529±11f	774±7d	5001±66ab	5153±65ab
P ₁₆₀	7742±97hi	8034±70hi	2399±44cd	2232±88bcd	534±11f	649±6h	4874±109bc	4608±62d
平均 Mean	8879.17±86	9101.25±99	232.21±50	2201.18±67	555.85±16	720.56±12	4916.00±69	4813.97±79

8.2%,且品种间差异显著($P<0.05$)(图3A)。可见,品种显著影响着胡麻籽粒钙含量。

2.5 磷对籽粒钠含量的影响

胡麻籽粒中钠含量受年份影响显著(表1)。2018年籽粒钠含量是556 mg·kg⁻¹,比2019年低22.9%。三个品种中,陇亚杂1号钠含量最高(710 mg·kg⁻¹),下来依次是张亚2号(631 mg·kg⁻¹)和陇亚14号(574 mg·kg⁻¹),且品种间差异显著($P<0.05$)

(图3B)。以上数据表明,胡麻籽粒钠含量受品种影响显著。籽粒钠含量最高达842 mg·kg⁻¹,是陇亚杂1号2019年在80 kg P₂O₅·hm⁻²下所得,最低419 mg·kg⁻¹,是2018年陇亚14号在120 kg P₂O₅·hm⁻²时获得(表3)。不难看出,年份、磷和品种互作显著影响着籽粒钠含量。

2.6 磷对籽粒镁含量的影响

本试验中,胡麻籽粒镁含量受磷影响显著(表

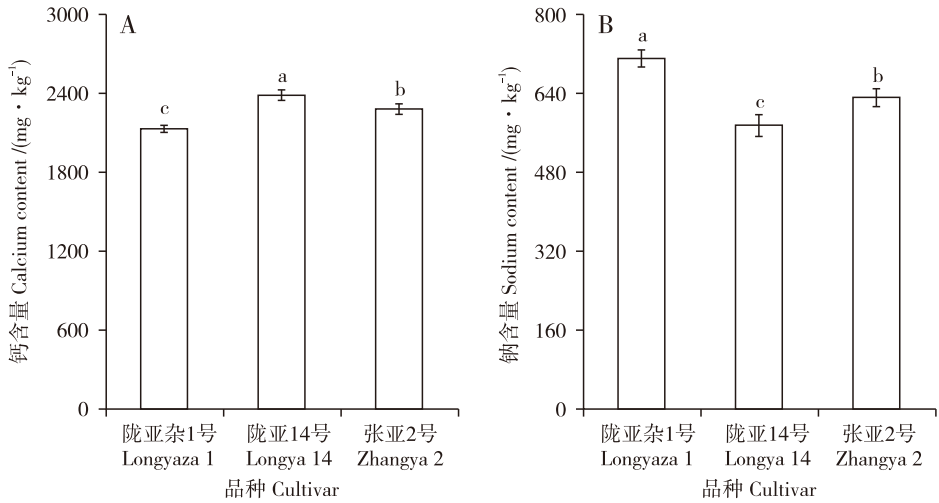


图3 不同品种对胡麻籽粒钙和钠含量的影响

Fig. 3 Effect of different cultivar on seed calcium and magnesium contents of flaxseed

1), 随施磷量增加, 籽粒镁含量不同程度升高(图2C), 相比不施, 施磷 $40 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 籽粒镁含量分别平均提高 4.4%、11.9%、12.5% 和 5.5%。在 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 达 $5120 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但与 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ ($5094 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时的含量差异不显著 ($P>0.05$) (图2C)。图2C 不难看出, 施磷量 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 为提高胡麻籽粒镁含量的适宜施磷量。年份、磷和品种间互作影响着籽粒镁含量(表1)。籽粒镁最低和最高含量分别是陇亚杂1号和张亚2号于2019年在0和 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 测得(表3)。相比不施, 施磷陇亚杂1号、陇亚14号和张亚2号籽粒镁含量2018年分别平均提高 2.8%、8.7% 和 5.5%, 2019年分别平均提高 15.9%、7.1% 和 12.6%。

3 讨论

通过合理施肥提高产量和营养品质, 已成为胡麻栽培研究的重点。本试验中, 胡麻籽粒产量随磷量增加先升高后略有降低, 施磷量 $40 \sim 160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 产量差异不显著, 与前面研究结果一致^[8-10]。施磷量适宜, 作物叶面积指数和光合利用率提高; 施磷量过高反而会使其降低^[25]。根据 Ozturk 等^[26]人研究, 土壤中有效磷含量大于 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 较佳, 小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时较低。本试验中, $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土壤中有效磷介于 $8.7 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 磷含量属于中低水平, 所以, 施磷 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量增幅显著, 施磷超过 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量降低。在影响产量的众多因素之中, 年份(包括当年的温度、降雨及土壤条件等因素)也是重要影响因子之一, 这一点与前面结果一致^[8,10]。本试验中, 2018年籽粒产量显著高于2019年, 可能与2018年土壤基础养分中有机质、速效磷、速效钾含量比2019年高有关。李圆宾等^[27]利用 meta 分析法通过对 162 篇文献进行定量分析, 结果表明, 土壤速效磷和速效钾含量与稻麦产量呈显著正相关关系。说明土壤速效磷和速效钾含量正向影响作物籽粒产量, 本文结果与之相互印证。此外, 两年间降雨和温度等因素也影响着籽粒产量, 详情需进一步探究。不同胡麻品种间在产量上存在显著差异^[28], 本试验再现了这一差异, 而且陇亚14号产量显著高于其它两个品种。

作为西北和华北地区主要的油料和经济作物, 胡麻籽粒钾、钙、钠和镁等含量丰富^[2]。这就为人群中普遍存在的钙镁缺乏^[29]问题提供了解决方案, 即结合品种, 应用合理的施肥策略, 提高作物籽粒金

属元素含量^[30]。胥亚玲^[12]研究表明, 随施磷量增加, 小麦籽粒钾、钙、镁含量均显著提高, 施磷 $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达最高值, 继续增加磷肥水平, 以上参数均显著下降, 这与本文结果有相似之处。本试验中, 随施磷量从 $0 \sim 120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$, 胡麻籽粒钾、钙和镁含量显著升高, 增加施磷量到 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时这些指标有所降低。且分析表明, 施磷 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 可显著促进胡麻籽粒对钾、钙、镁的吸收。课题组前期研究表明, 随施磷量增加, 胡麻油产量增加^[10]。结合来看, 施用适量磷肥有助于胡麻油产量和籽粒钾、钙、镁含量协同增加。水稻上适量增施磷肥有利于增加稻米镁含量^[13]。花生上, 与不施磷相比, 施磷处理籽粒钙含量有增加趋势, 但增加不显著^[14]。沈金雄等盆栽甘蓝型油菜的试验结果表明, 施磷可以增加油菜籽粒钾和镁的含量^[15]。另外, 马铃薯^[11]块茎钙含量随磷的变化也与本试验结果一致。

蛋白质作为胡麻籽粒中一种重要成分, 对人类健康十分有益^[31]。在休闲食品、功能保健食品、烘焙食品及乳品等中添加适量富含蛋白质的胡麻籽, 能更好地满足人们日益增长的需求。本研究中, 施磷对籽粒蛋白质含量没有影响。油菜的研究中, Brennan 和 Bolland^[32]以及 Morshedi^[20]发现, 磷肥对油菜籽粒蛋白质含量没有影响。Krueger 等^[18]表明, 磷对大豆籽粒蛋白质含量也没有影响, 马铃薯^[11]上也类似。我们发现, 2018年籽粒蛋白质含量比2019年高 9.2%, 推测其原因可能与两年不同的降雨和温度等因素有关^[19]。胡麻籽粒蛋白质含量受年份和磷水平互作影响, 这一点与 Blamey 和 Chapman^[33]在向日葵上研究结果相似。

4 结论

磷对胡麻籽粒产量的影响显著, 随施磷增加, 产量显著提高, 在 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时达最高, 继续增加施磷量, 产量略有降低; 施磷 80、120 和 $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理间产量差异不显著。胡麻籽粒钾、钙、镁含量随施磷量增加先增加后减少, 且施磷 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时含量提高显著。籽粒蛋白质和钠含量不受磷影响。籽粒产量、籽粒钙和钠含量受品种影响, 籽粒产量和籽粒钙含量陇亚14号最高, 分别达 $1841 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2382 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 籽粒钠含量, 陇亚杂1号最高, 达 $710 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。综合考虑, 该胡麻种植区域, 施磷量 $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜, 可协同增加籽粒产量和籽粒钾、钙、镁含量, 同时可减少磷资源浪

费,降低环境风险。

参考文献:

- [1] Goyal A, Sharma V, Upadhyay N, et al. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51 (9): 1633–1653. DOI: 10.1007/s13197-013-1247-9.
- [2] Kaur P, Waghmare R, Kumar V, et al. Recent advances in utilization of flaxseed as potential source for value addition [J]. OCL, 2018, 25 (3): A304. DOI: 10.1051/ocl/2018018.
- [3] FAO, 2021a. Food and Agriculture Organization Statistical Databases. Lanzhou, China (accessed 20 February, 2021). <http://www.fao.org/faostat/zh/#compare>.
- [4] FAO, 2021b. Food and Agriculture Organization Statistical Databases. Lanzhou, China (accessed 1 February, 2021). <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [5] Chai Q, Nemecek T, Liang C, et al. Integrated farming with intercropping increases food production while reducing environmental footprint [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2021, 118 (38): e2106382118. DOI: 10.1073/pnas.2106382118.
- [6] FAO, 2021c. Food and Agriculture Organization Statistical Databases. Lanzhou, China (accessed 17 Oct, 2021). <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/RFN/visualize>
- [7] Bouis H E, Welch R M. Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south [J]. Crop Sci, 2010, 50: S–20. DOI: 10.2135/cropsci2009.09.0531.
- [8] Xie Y P, Niu X X, Niu J Y. Effect of phosphorus fertilizer on growth, phosphorus uptake, seed yield, yield components, and phosphorus use efficiency of oilseed flax [J]. Agron J, 2016, 108 (3): 1257–1266. DOI: 10.2134/agronj2015.0537.
- [9] 谢亚萍, 闫志利, 李爱荣, 等. 施磷量对胡麻干物质积累及磷素利用效率的影响[J]. 核农学报, 2013, 27 (10): 1581–1587. DOI: 10.11869/hnxb.2013.10.1581.
- [10] Xie Y P, Yan Z L, Niu Z X, et al. Yield, oil content, and fatty acid profile of flax (*Linum usitatissimum* L.) as affected by phosphorus rate and seeding rate [J]. Ind Crops Prod, 2020, 145: 112087. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112087.
- [11] 孙世成. 磷肥对不同地区马铃薯产量与营养品质的调控[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [12] 胥亚玲. 氮磷对旱地冬小麦产量、养分利用及籽粒矿质营养品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [13] 俄胜哲, 袁继超, 丁志勇, 等. 氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙含量和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19 (5): 434–440. DOI: 10.16819/j.1001-7216.2005.05.009.
- [14] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 施用磷和钙对花生生长、产量及磷钙利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2021(1): 187–192. DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2021.01.026.
- [15] 沈金雄, 李志玉, 廖星, 等. 磷对甘蓝型油菜产量及矿质营养吸收与积累的影响[J]. 作物学报, 2006, 32 (8): 1231–1235. DOI: 10.3321/j.issn: 0496-3490.2006.08.021.
- [16] Hall C III, Tulbek M C, Xu Y Y. Flaxseed[M]//Advances in Food and Nutrition Research. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1–97. DOI: 10.1016/s1043-4526 (06) 51001-0.
- [17] Abbasi M K, Tahir M M, Azam W, et al. Soybean yield and chemical composition in response to phosphorus – potassium nutrition in Kashmir [J]. Agron J, 2012, 104 (5): 1476–1484. DOI: 10.2134/agronj2011.0379.
- [18] Krueger K, Goggi A S, Mallarino A P, et al. Phosphorus and potassium fertilization effects on soybean seed quality and composition [J]. Crop Sci, 2013, 53 (2): 602–610. DOI: 10.2135/cropsci2012.06.0372.
- [19] Yin X H, Bellaloui N, McClure A M, et al. Phosphorus fertilization differentially influences fatty acids, protein, and oil in soybean [J]. Am J Plant Sci, 2016, 7 (14): 1975–1992. DOI: 10.4236/ajps.2016.714180.
- [20] Morshedi A. An investigation into the effects of sowing time, N and P fertilizers on seed yield, oil and protein production in Canola [J]. Arch Agron Soil Sci, 2011, 57 (5): 533–547. DOI: 10.1080/03650341003641763.
- [21] Xie Y P, Wang B, Wang, L M, et al. Seed filling dynamic traits of oil flax in response to nitrogen and phosphorus [J]. Oil Crop Science, 2019, 4 (3): 152–165. DOI: 10.3969/j.issn.2096-2428.2019.03.003.
- [22] 蒋曦龙, 乔月彤, 李晓靖, 等. 叶面过量施硒对玉米产量、硒和矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报, 2021, 35 (12): 2841–2849. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2021.12.2841.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Zimmer S, Messmer M, Haase T, et al. Effects of soybean variety and *Bradyrhizobium* strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany [J]. Eur J Agron, 2016, 72: 38–46. DOI: 10.1016/j.eja.2015.09.008.
- [25] Zhang W, Chen X X, Liu Y M, et al. The role of phosphorus supply in maximizing the leaf area, photosynthetic rate, coordinated to grain yield of summer maize [J]. Field Crops Res, 2018, 219: 113–119. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.01.031.
- [26] Ozturk L, Eker S, Torun B, et al. Variation in phospho-

- rus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil [J]. *Plant Soil*, 2005, 269(1/2): 69–80. DOI: 10.1007/s11104-004-0469-z.
- [27] 李圆宾, 李鹏, 王舒华, 等. 稻麦轮作体系下有机肥施用对作物产量和土壤性质影响的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3231–3239. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202109.024.
- [28] Dordas C A. Variation of physiological determinants of yield in linseed in response to nitrogen fertilization [J]. *Ind Crops Prod*, 2010, 31(3): 455–465. DOI: 10.1016/j.indcrop.2010.01.008.
- [29] Welch R M, Graham R D. Agriculture: the real nexus for enhancing bioavailable micronutrients in food crops [J]. *J Trace Elem Med Biol*, 2005, 18(4): 299–307. DOI: 10.1016/j.jtemb.2005.03.001.
- [30] White P J, Broadley M R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine [J]. *New Phytol*, 2009, 182(1): 49–84. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x.
- [31] Rabetafika H N, Van Remoortel V, Danthine S, et al. Flaxseed proteins: food uses and health benefits [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2011, 46(2): 221–228. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2010.02477.x.
- [32] Brennan R F, Bolland M D A. Effect of fertiliser phosphorus and nitrogen on the concentrations of oil and protein in grain and the grain yield of canola (*Brassica napus* L.) grown in south-western Australia [J]. *Aust J Exp Agric*, 2007, 47(8): 984. DOI: 10.1071/ea06115.
- [33] Blamey F P C, Chapman J. Protein, oil, and energy yields of sunflower as affected by N and P Fertilization I [J]. *Agron J*, 1981, 73(4): 583–587. DOI: 10.2134/agronj1981.00021962007300040004x.

(责任编辑:郭学兰)