

秸秆还田下施镁对土壤交换镁及春玉米镁素积累和产量的影响

张美玲, 耿玉辉, 曹国军, Stephano Mabagala Frank, 黄琦嘉, 周丽娟

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 于2017—2019年在吉林省农安县设置大田试验, 采用双因素裂区设计, 主区为秸秆还田 J(12 000 kg/hm²)、秸秆不还田 W, 副区为施镁 M3(施纯镁 10 kg/hm²)、不施镁 M0, 包含 JM3(秸秆+镁肥)、JM0(秸秆+无镁肥)、WM3(无秸秆+镁肥)、WM0(常规)4个处理。结果表明: 玉米生育期, 土壤交换镁含量逐渐降低, 至成熟期, JM3处理土壤交换镁含量比 WM3、JM0、WM0分别提高 6.59%, 8.47%, 14.09%。施用镁肥促进玉米植株对镁素养分的吸收, 秸秆还田配施镁肥进一步增加了玉米植株对镁素养分的吸收, WM3处理玉米镁素积累量比 WM0平均提高 12.30%; JM3处理的镁素积累量比 WM3、JM0、WM0处理分别提高 9.79%, 15.99%, 23.28%。春玉米干物质积累量随着生育期的进行逐渐增加, 施镁肥能提高干物质积累量与春玉米产量, 在成熟期 WM3(无秸秆+镁肥)的干物质积累量与产量分别比 WM0(常规)提高 5.30%与 4.38%, JM3(秸秆+镁肥)的干物质积累量与产量比 WM0(常规)分别提高 11.50%与 5.52%。综上所述可以得出, 施用镁肥可以显著提高土壤交换镁含量, 促进春玉米植株对镁素养分的吸收, 增加干物质积累量及提高春玉米产量。秸秆还田配施镁肥不但可以提高土壤交换镁含量, 保持土壤镁素在整个玉米生育期的持续有效供应, 还进一步促进春玉米植株对镁素的吸收, 提高了干物质积累量及春玉米产量。

关键词: 春玉米; 秸秆还田; 镁肥; 土壤交换镁; 干物质; 产量

中图分类号: S143

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0226-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.034

Effects of Magnesium Application on Exchangeable Magnesium and Magnesium Accumulation in Soil and Yield of Spring Maize Under Straw Returning

ZHANG Meiling, GENG Yuhui, CAO Guojun,

Stephano Mabagala Frank, HUANG Qijia, ZHOU Lijuan

(College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: Field experiment was set up in Nong'an County, Jilin Province from 2017 to 2019. Field double factor split design was employed, with two straw treatments in main plots, which were straw returning J (12 000 kg/hm²) and no straw returning (W), and the sub-plots were magnesium fertilizer M3 (10 kg/hm²), no magnesium fertilizer M0, and the treatments included JM3 (straw + magnesium fertilizer), JM0 (straw + no magnesium fertilizer), WM3 (no straw + magnesium fertilizer) and WM0 (no magnesium fertilizer + no straw). The results showed that during the growth period of maize, the content of exchangeable magnesium in the soil gradually decreased. At the mature stage, the content of soil exchangeable magnesium in JM3 treatment was 6.59%, 8.47% and 14.09% higher than that in WM3, JM0 and WM0 treatment, respectively. The application of magnesium fertilizer could promote the magnesium absorption in maize plants, and straw returning to the field combined with magnesium fertilizer application could further increase the uptake of magnesium in maize. The average magnesium accumulation in the WM3 treatment was 12.30% higher than that in WM0 treatment. The magnesium accumulation in JM3 treatment was 9.79%, 15.99% and 23.28% higher than that in WM3, JM0 and WM0 treatments, respectively. The accumulation of dry matter in maize increased continuously during the growth period. Applying magnesium fertilizer could improve the production of dry matter and the yield of spring maize. At the maturity growth stage, the dry matter accumulation and yield of maize in WM3 treatment was 5.30% and 4.38% higher than that in WM0 treatment.

收稿日期: 2019-10-22

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300604)

第一作者: 张美玲(1991—), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力调控研究。E-mail: zhangmeiling837@163.com

通信作者: 耿玉辉(1973—), 男, 吉林通化人, 副教授, 博士, 主要从事土壤肥力调控研究。E-mail: gengyuhui@163.com

The dry matter accumulation and yield of maize in JM3 treatment was 11.50% and 5.52% greater than that in WM0 treatment. In conclusion, the application of magnesium fertilizer could significantly improve the content of exchangeable magnesium in soil, promote the absorption of magnesium nutrients in spring maize plants, increase the dry matter accumulation and spring maize yield. Straw returning to the field with applying magnesium fertilizer could not only improve the content of soil exchangeable magnesium, maintain the continuous and effective supply of soil magnesium in the whole growth period of maize, but also further promote the absorption of magnesium nutrients by spring maize plants, increase the dry matter accumulation and yield of spring maize.

Keywords: spring maize; straw returning; magnesium fertilizer; exchange magnesium in soil; dry matter; yield

玉米是重要的粮食、饲料和工业原料作物,在保障国家粮食安全中占有重要地位。当前提高玉米产量的主要方式仍然是通过大量施用无机肥,其中以氮磷钾为主。随着氮、磷、钾肥施用量的不断增加,土壤中微量元素的供应开始出现相对不足,甚至成为粮食产量进一步增长的限制因子。镁素作为植物必需营养元素之一,在植物的生理生化过程中起着重要作用。镁不仅提高植株叶片的光合性能,促进叶面积和地上部分生物量的增加,而且显著增加根系生物量,提高根冠比,对玉米后期生长发育有着积极的意义。维持镁的充足供应,有利于减少作物生产中与热应激有关的损失,有利于养分积累。有研究^[1]发现,在水稻生长的不同时期(苗期、分蘖期、穗分化期)平衡施入微量元素与氮磷钾,增加了水稻千粒重、穗粒数及产量;Huang 等^[2]研究表明,施用镁肥使蔬菜增产 12.4%~20.4%,蔬菜镁含量增加 3.2%~131.9%。此外,菜地土壤总镁和交换镁含量在丰收后也得到提高。Wang 等^[3]研究表明,施用镁肥后,华南、华北和全国的作物产量分别平均提高 19.2%,11.3%和 16.6%。此外,高钾、高氮、高钙土壤还可施用镁肥,以平衡养分吸收,最终提高作物产量。

也有研究^[4]表明,由于过量施用化肥、高产品种的引进、作物长期丰收、不施镁肥等因素,导致土壤镁库枯竭,作物缺镁症状显现。镁在土壤溶液中作为二价阳离子存在,具有较高的水合半径,被土壤胶体的吸附较低,极易浸出。此外,从土壤矿物中释放出的镁量相对较少,难以满足高作物产量和质量提高对镁素的需求量^[5]。尤其是在降水量多的酸性砂质土地区,其现象已由南方向北方延伸,由经济作物向大田作物发展,并已成为限制作物产量和品质提高的一个重要因素。已有研究^[6]表明,秸秆还田与矿质肥料配合施用,有利于土壤有效养分的持续缓慢供应,提高养分利用效率;Wei 等^[7]长期试验结果表明,有机物+化肥显著提高了 3 种作物小麦、玉米和水稻的产量;侯贤清等^[8]认为,在宁夏中部干旱区秸秆还田配施适量氮肥可改善土壤水肥状况,实现玉米增产增收,试

验以秸秆还田配施纯氮 300 kg/hm² 效果最为显著;Afsaneh 等^[9]认为,有机与无机肥施用显著增加大麦的产量,增施镁肥,大麦增产 8.6%。

当前虽然在镁肥对植物影响上的研究较多,但对土壤中镁素变化及玉米不同生育时期、不同器官中镁的积累和分配规律的研究相对较少。本试验通过连续 3 年的大田试验,探讨了秸秆还田条件下配施镁肥对土壤交换镁含量、春玉米植株镁素积累、干物质积累量及产量的影响,以期对春玉米合理施肥提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2019 年的 5—10 月在吉林省长春市农安县哈拉海镇东方红村(124°31'E,43°55'N)进行,该地处于松辽平原腹地,地势平坦,四季分明,属中温带大陆性气候。据试验点气象站记录,2017 年、2018 年和 2019 年春玉米生育期降雨量分别为 507.7、466.3、575.9 mm,≥10℃有效积温分别为 2 961、2 930、2 900℃。试验区为春玉米连作区,供试土壤为黑钙土,2017 年、2018 年和 2019 年春季耕种前,试验区 0—20 cm 土层土壤有机质含量分别为 25.00、27.98、29.10 g/kg,碱解氮含量分别为 109.20、107.31、100.15 mg/kg,速效磷含量分别为 33.90、36.93、37.62 mg/kg,速效钾含量分别为 114.10、113.59、123.59 mg/kg,交换镁含量分别为 434.94、436.19、455.14 mg/kg,pH 分别为 7.80、8.02 和 7.82。

1.2 试验设计

试验采用双因素裂区设计,以秸秆还田做主区,设置秸秆还田 12 000 kg/hm²(J)与秸秆不还田(W)2 种水平;施镁肥水平为副区,设置不施镁 M0、施镁 M3(纯镁 15 kg/hm²),总共 JM3、JM0、WM3、WM0 4 个处理。小区面积 35 m²,随机机组排列,3 次重复,2 边设有保护行。秸秆还田为春耕前将秸秆粉碎后撒施土壤表面,然后翻耕整地与土壤混合。镁肥为 MgSO₄·7H₂O,为撒施均匀,用塑料盆将每个小区的镁肥与一定数量土壤混匀后手施撒入垄沟内。玉米品种选用“富民 985”,种植

密度为 65 000 株/hm²,等行距种植。试验田的氮磷钾参照当地常规施肥量,各处理均施 N 240 kg/hm²,其中基肥占总施氮量的 40%,玉米的拔节期与抽雄期分别追肥总施氮量 30%。各处理均施 P₂O₅ 100 kg/hm²,K₂O 100 kg/hm²,作为基肥一次性施入。其他田间管理措施均与当地农民习惯保持一致。2017 年、2018 年和 2019 年分别在 5 月 7 日、5 月 10 日和 5 月 13 日播种,在 9 月 28 日、10 月 2 日和 9 月 24 日收获。

1.3 取样方法及时期

分别于玉米拔节期(V6)、喇叭口期(V12)、抽雄期(VT)、灌浆期(R2)、乳熟期(R3)和成熟期(R6)(2017 年在出苗后 40,59,68,94,110,130 天,2018 年在出苗后 39,57,66,92,109,131 天与 2019 年在出苗后 36,59,68,90,110,130 天)进行取样,每个时期从各小区采集长势大小均匀的玉米 3~5 株。按茎秆(除叶片和果穗以外的其余部分,包括茎秆、叶鞘、苞叶)、叶片(不包括叶鞘,以叶环为界)、穗和粒分开。热恒温鼓风烘箱内 105 ℃下杀青 30 min,80 ℃烘至恒重,样品粉碎后过 0.05 mm 筛后分析测试。

1.4 测定项目与方法

土壤交换镁含量采用 NH₄OAc 浸提—原子吸收分光光度法测定;植株及籽粒镁含量采用 HNO₃—

HClO₄ 消煮,原子吸收分光光度法(AAS)^[10];产量及产量构成因素于成熟期每处理取 10 m² 果穗,称取总鲜果穗质量,按平均鲜穗质量从中选取 10 穗,待自然风干后考种,考察穗部性状与产量构成因素(穗粒数和千粒重等)。籽粒按含水量 14%折算产量。

1.5 统计与分析方法

采用 Microsoft Excel 2019 和 Sigma Plot 12.5 软件进行数据处理和绘图,采用 SPSS 25.0(Duncan $P<0.05$)(SPSS Inc.,Chicago,IL,USA)进行显著方差分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施镁肥对春玉米产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,施用镁肥提高了春玉米的千粒重和穗粒数,其中对穗粒数提高更为显著,进而提高了春玉米产量。不同处理对春玉米籽粒产量的影响整体表现为 JM3>WM3>WM0>JM0。其中无秸秆还田条件下,WM3 处理玉米产量比 WM0 处理 3 年平均增加 4.38%,秸秆还田条件下 JM3 处理玉米产量比 JM0 处理增加 4.73%,且差异性显著($P<0.05$)。说明施镁可以起到增产的效果。所有处理中,秸秆还田配施镁肥 JM3 处理玉米产量达到最高,3 年平均产量为 11 717 kg/hm²,比无秸秆无镁肥处理 WM0 增产 5.52%。

表 1 不同处理春玉米产量及产量构成因素

处理	2017 年			2018 年			2019 年		
	千粒重/ g	穗粒数/ 粒	产量/ (kg·hm ⁻²)	千粒重/ g	穗粒数/ 粒	产量/ (kg·hm ⁻²)	千粒重/ g	穗粒数/ 粒	产量/ (kg·hm ⁻²)
JM3	328a	611a	11744a	319a	577a	11695a	312a	609a	11713a
JM0	306bc	577c	11345b	305b	536b	11052b	306b	585b	11171c
WM3	315b	595b	11652a	311ab	523b	11660a	310ab	576bc	11461b
WM0	300c	576c	11196c	308b	503c	11067b	306b	568c	11049c

注:同列不同字母表示处理间差异达到显著水平($P<0.05$)。

2.2 秸秆还田配施镁肥对春玉米地上部干物质积累的影响

从图 1 可以看出,随着春玉米生育时期的推移,春玉米地上部干物质积累量逐渐增加,整个生育期,地上部干物质积累量从拔节期开始显著增加,喇叭口期到抽雄期增长速率加快,抽雄期之后一直保持快速增长态势,至乳熟期增长趋于缓慢,完熟期达到最大值。各个处理之间总体表现为 JM3>WM3>JM0>WM0。成熟期在无秸秆还田的情况下,施镁肥处理 WM3 的干物质积累量比不施镁肥处理 WM0 提高 5.30%;在秸秆还田情况下,JM3 处理的干物质积累量比 JM0 处理平均高 8.61%,说明镁肥的施用促进了春玉米干物质的积累。在无镁肥施入情况下,JM0 处理的干物质积累量比 WM0 处理增加 2.64%;在镁肥施入情况下,JM3 处理的干物质积累量比 WM3 处理增加 5.88%。秸秆还田下施镁 JM3 处理的干物质

积累量最高,比 WM0 提高 11.50%,说明秸秆还田配合镁肥施用可获得较高干物质积累量。

2.3 秸秆还田配施镁肥对春玉米镁素养分累积的影响

从图 2 可以看出,玉米镁养分积累量随着生育期的进程逐渐增加,且呈现拔节期开始增加较快,至灌浆期后积累变缓的趋势。在拔节期各个处理差异性不显著,抽雄期之后,秸秆还田处理的镁养分积累量明显高于无秸秆处理及单独施镁肥处理,且差异性显著($P<0.05$),至成熟期,玉米植株中镁养分积累量达到最大值,整体表现为 JM3>WM3>JM0>WM0。其中无秸秆还田条件下,施镁处理 WM3 比 WM0 平均高出 12.30%,秸秆还田条件下,施镁处理 JM3 比 JM0 平均高出 15.99%,且差异性显著($P<0.05$);秸秆还田条件下,JM0 处理比 WM0 处理平均高出 6.37%,JM3 比 WM3 平均高出 9.79%,即对于同一个施镁肥条件下,秸秆还田植株镁积累量高于非

秸秆还田, 秸秆还田配施镁肥处理 JM3 比常规 WM0 高出 23.28%, 表明秸秆还田下配施镁肥可显著增加玉米植株镁养分积累量。

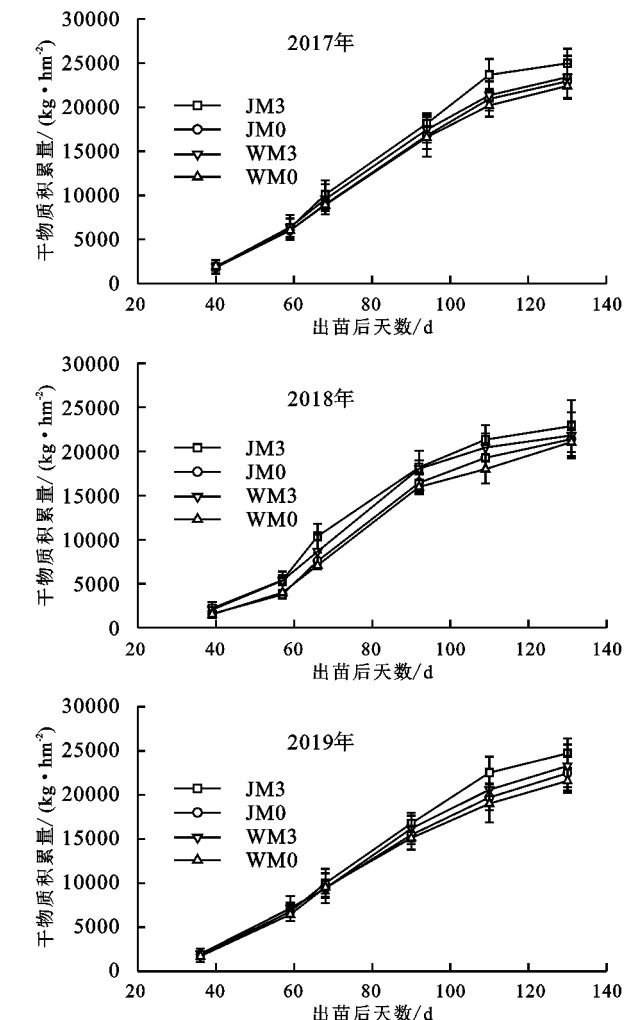
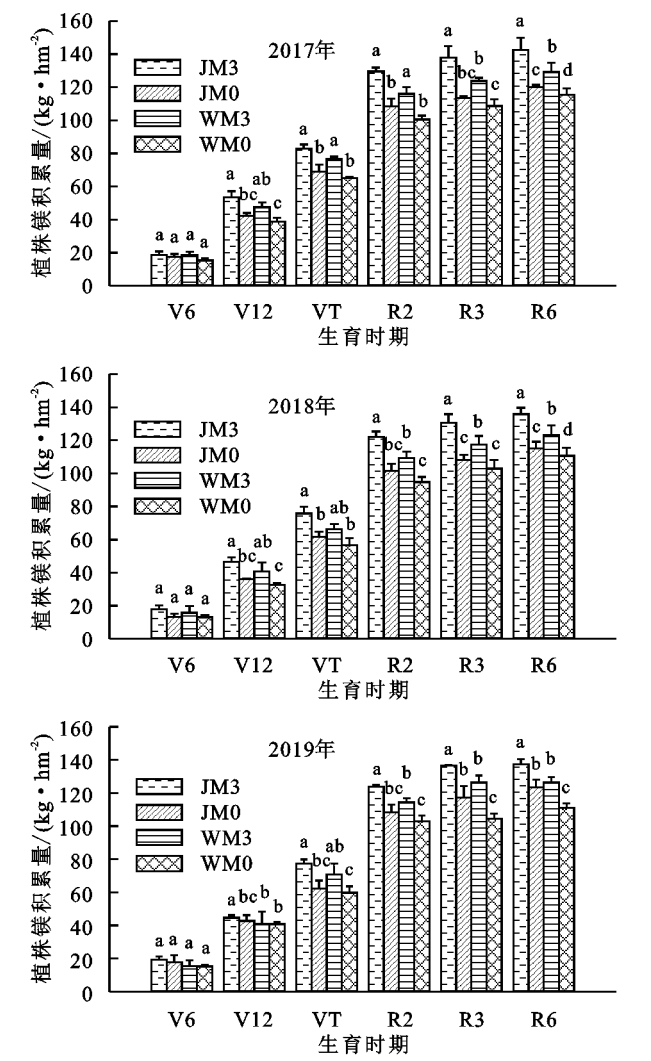


图1 不同处理春玉米植株地上部干物质积累量

2.4 秸秆还田配施镁肥对土壤交换镁的影响

由图3可知,不同处理下土壤交换镁含量随着春玉米生育时期的推移逐渐降低。在春玉米不同生育时期中,在拔节期各处理土壤交换镁含量均处于较高的水平,且拔节期到喇叭口期交换镁含量下降迅速,之后呈缓慢下降趋势。至成熟期,WM3、WM0、JM3、JM0 分别降低 23.00%,23.47%,16.32%,19.04%。不同处理土壤交换镁含量在玉米整个生育时期总体表现为 JM3>WM3>JM0>WM0。到完熟期,在无秸秆还田时,施镁肥处理 WM3 比不施镁肥处理 WM0 土壤交换镁含量高 7.02%,在秸秆还田条件下, JM3 比 JM0 土壤交换镁含量高 8.47%,说明镁肥施用可以增加土壤交换镁含量。在无镁肥施用情况下,完熟期秸秆还田处理 JM0 比 WM0 土壤交换镁含量增加 5.17%。在施镁肥情况下, JM3 处理比 WM3 土壤交换镁含量增加 6.59%,比 WM0 增加 14.09%,说明秸秆还田可以增加土壤的交换镁含量,且秸秆还田配施

镁肥增加土壤交换镁效果更加明显。



注:图中同一生育期不同小写字母表示各处理间差异达显著水平($P<0.05$)。

图2 不同处理春玉米地上部镁积累量

3 讨论

3.1 秸秆还田配施镁肥对春玉米干物质积累及产量的影响

干物质是产量形成的物质基础,在一定范围内,干物质积累量越高意味着籽粒产量越高。干物质生产及其分配是衡量作物总体生产性能和对生长条件响应的最佳尺度和指标^[11]。本试验结果表明,施镁肥不会改变植株干物质积累的整体趋势,干物质积累量随着生育期的进行逐渐增加。Dromantien^e等^[12]通过对冬小麦不同时期喷施镁,干物质有着不同程度的增加,认为当在孕穗期施用 2.5%的 MgO 溶液后,干物质含量增加幅度最大。本研究表明,在玉米生育前期不同处理生物量差异并不显著,可能由于基肥能满足作物前期对镁素养分的需求,后期随着作物的吸收及土壤的固定,交换镁含量逐渐减少。至成熟期玉米植株干物质积累量达到最大值,此时施镁肥处理 WM3 干物质积累量比 WM0 提高 5.30%, JM3 比

JM0 提高 8.61%，说明施用镁肥能够增加玉米干物质积累，这与埃及 El-Dissoky 等^[13]的田间试验结果基本一致，表明施用镁肥能提高玉米镁元素含量，促进玉米在成熟期秸秆、穗轴等干物质的增加，进而增加整个植株干物质产量。干物质的增加有利于促进产量的增加，在成熟期施镁处理 WM3 产量比 WM0 提高 4.38%，表明施镁促进了干物质的积累，从而促进作物产量的增加。

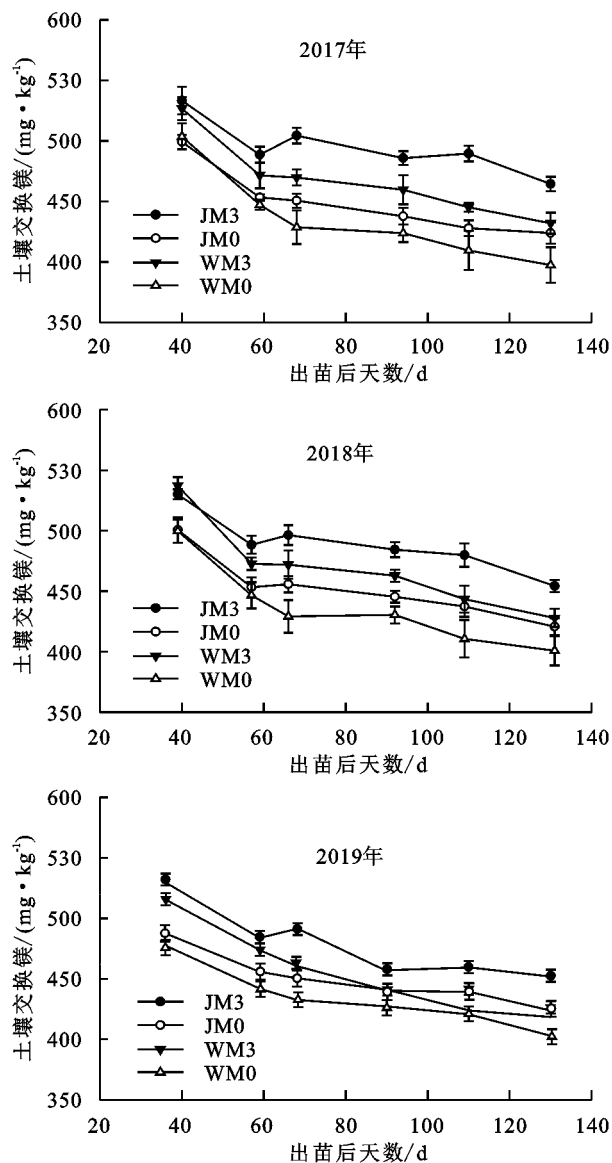


图 3 土壤交换镁含量动态

玉米干物质积累与产量不仅受到镁肥的影响，还受到秸秆还田的显著影响。秸秆还田可以增加玉米穗粒数、千粒重、产量及花后干物质积累速率^[14]。张姗等^[15]试验表明，在相同施氮量下，秸秆还田处理的干物质、磷、钾积累均高于无秸秆还田处理，高施氮量促进了秸秆分解和养分释放，降低了拔节后秸秆养分释放的比例。秸秆还田配施氮肥提高了粮食产量，随着施氮量的增加，干物质、氮、磷、钾的积累量显著增加。周建斌^[16]认为，有机和无机养分的结合确保了

养分释放和植物吸收之间的更大同步性，从而提高了作物产量；谭德水等^[17]发现，秸秆还田与钾肥相结合，可以降低土壤钾素的固定。与单独使用秸秆相比，可获得最高的小麦和玉米产量。本研究结果表明，秸秆还田处理的玉米地上部干物质积累、产量都高于普通施肥处理，秸秆还田下配施镁肥处理 JM3 比 WM0 干物质高 11.50%，产量高 5.52%。这是因为秸秆还田条件下，镁肥肥效持续时间长，能够保证在生育后期为作物不断提供充足的镁素养分，促进光合作用，增加叶绿素含量，促进玉米干物质积累量，最终增加玉米产量。

3.2 秸秆还田配施镁肥对春玉米镁素累积的影响

在禾谷类作物中，玉米对镁的反应最为敏感。镁肥的施用，增加土壤交换性镁含量，提高土壤镁的饱和度，增加植株的含镁量^[18]。本研究表明，在玉米成熟期，施镁肥处理 WM3 玉米镁素养分积累量比不施镁肥处理 WM0 平均提高 12.30%；施镁肥处理 JM3 的镁素养分积累量比不施镁肥处理 JM0 平均提高 15.99%，表明施镁肥促进玉米植株对镁素养分的吸收。镁的养分释放特性对于植物镁的持续供应非常重要。养分释放缓慢，造成养分供应不足；相反，快的养分释放率，则容易造成养分的流失。Sharma 等^[19]认为，平衡施入有机肥与无机肥可以改善交换钙 (Ca) 和镁 (Mg) 的含量。而秸秆中含有丰富有机质，一方面秸秆通过自身分解过程中释放有机酸类物质，促进矿物分解释放养分，使固定态的镁向有效镁转化；另一方面秸秆分解转化形成的有机质可以通过络合作用提高土壤中镁的有效性，因而有利于活化土壤中的镁素，促进植物对养分的吸收。另外，秸秆具有保肥功效，对养分起到缓慢释放的作用，从而有利于养分的持续供应。本研究中，相同施镁肥量情况下，秸秆还田处理的玉米镁素养分积累量始终高于无秸秆还田处理。在玉米成熟期，无镁肥情况下，秸秆还田的镁素养分积累量 JM0 比无秸秆还田处理 WM0 平均提高 6.37%。秸秆还田配合镁肥施用情况下，JM3 处理的镁素养分积累量比 WM0 处理平均提高 23.28%，说明秸秆还田配合施镁可以提高施镁的效果，进一步促进了玉米植株对镁素养分的吸收。

3.3 秸秆还田配施镁肥对春玉米土壤中镁素的影响

镁是植物叶绿素的中心原子，调控植物光合作用，同时还是许多酶的激活剂，参与大部分酶的激活过程，维持植物组织结构的稳定，对植株生长非常重要。植物吸收的镁主要来自土壤交换态镁，土壤交换性镁含量是评价镁素养分供应水平的主要指标^[20]。土壤中的镁浓度，随着植株的生长逐渐降低。王飞等^[21]研究表明，在基肥中添加氯化镁，提高了表层土

壤中 Mg^{2+} 浓度, 促进根系吸收, 进而增加了花生植株对 Mg 的吸收, 有利于提高花生产量。本试验结果表明, 由于拔节前, 植株生长相对较慢, 对养分需求较少, 拔节期后, 植株进入生长旺盛期, 对养分需求迅速增加, 因而消耗土壤养分较多, 相比拔节后其他时期, 拔节期的土壤交换镁含量相对较高, 为此随着生育期的进行, 土壤交换镁含量逐渐减少, 在玉米成熟期, 施镁肥处理 WM3 降低 23.00%, WM0 处理降低 23.47%, 相对于不施镁肥处理, 施用镁肥可以显著提高土壤交换镁含量, 在完熟期施镁 WM3 处理土壤交换态镁的含量比 WM0 处理提高 7.02%。

矿质营养肥料施用后具有易挥发、淋洗和被土壤矿质颗粒固定的特性。镁肥施入土壤中迅速转化, 使土壤交换镁含量在短期内快速增加, 而在转化过程中由于镁元素本身具有相对小的离子半径与大的水合半径, 易淋洗, 导致镁养分在玉米需肥量较少的前期大量被淋失, 而在玉米大量需肥的中后期可能又出现供肥不足的现象, 不仅降低肥效, 影响作物生长, 而且镁离子随降雨或灌溉水分淋溶进入地下水还会污染环境。已有研究^[22]表明, 有机肥的施用增加了土壤中镁的含量, 防止更多的镁被淋溶到植物根系没有或很少接触到的土层中, 同时对作物养分(大量和微量养分)能起到缓慢释放的作用; Geng 等^[23]认为, 适当比例的有机替代物不仅可以提供足够的养分, 而且可以改善土壤环境并提高产量; 李朝苏等^[24]研究表明, 秸秆还田可显著提高作物中后期土壤养分含量。本试验结果表明, 在整个玉米生育期秸秆还田下配施镁肥(JM3)处理始终处于最高水平, 随着生育期的进行交换镁含量降低趋势也比较和缓, JM3 处理在玉米生长中后期仍能维持较高的镁素含量, 至成熟期 JM3 比 WM3 增加 6.59%, 比 WM0 增处理加 14.09%, 这说明秸秆还田下配施镁肥能有效减少镁素淋溶和固定, 提高土壤镁的有效性, 有利于镁素养分的持续有效供应。

4 结论

(1) 施用镁肥可以有效提高土壤交换镁含量, 促进春玉米对镁素养分的吸收, 并最终提高春玉米干物质积累量和籽粒产量。

(2) 秸秆还田配施镁肥不但提高了土壤交换镁含量, 而且还可以保持土壤镁素在整个玉米生育期的持续有效供应, 秸秆还田配施镁肥比单独施用镁肥更能促进春玉米干物质积累并增加春玉米产量。

参考文献:

[1] Shaygany J, Peivandy N, Ghasemi S. Increased yield of direct seeded rice (*Oryza sativa* L.) by foliar fertilization through multi-component fertilizers[J]. Archives of

Agronomy and Soil Science, 2012, 58(10): 1091-1098.

[2] Huang D F, Wang L M, Wei X Q, et al. Effects of applying magnesium fertilizer on Chinese cabbage's yield, nutrient elements' uptake and soil's fertility[C]//2nd Annual International Conference on Energy, Environmental and Sustainable Ecosystem Development. France: Atlantis Press, 2016.

[3] Wang Y H, Li Y J, He X H, et al. Response of crop yields to magnesium fertilization: A meta-analysis in China[J]. International Journal of Agricultural Sciences, 2016, 6(4): 1011-1015.

[4] Chen Y L, Wu D L, Mu X H, et al. Vertical distribution of photosynthetic nitrogen use efficiency and its response to nitrogen in field-grown maize[J]. Crop Science, 2016, 56(1): 397-407.

[5] Senbayram M, Gransee A, Wahle V, et al. Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum[J]. Crop and Pasture Science, 2016, 66(12): 1219-1229.

[6] Tong X, Xu M, Wang X, et al. Long-term fertilization effects on organic carbon fractions in a red soil of China[J]. Catena, 2014, 113: 251-259.

[7] Wei W L, 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 and Environment, 2016, 225: 86-92.

[8] 侯贤清, 吴鹏年, 王艳丽, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤水肥状况和玉米产量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1928-1934.

[9] Afsaneh A S, Hatima R G, R Arsham R P R. Usefulness of Zn, Mg, Fe and fertilizer on seed germination characters of barley (*Hordeum vulgare*) [J]. International Journal of Manures and Fertilizers, 2013, 2(2): 272-274.

[10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[11] Karikari B, Arkorful E. Effect of phosphorus fertilizer on dry matter production and distribution in Three Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) varieties in Ghana[J]. Journal of Plant Sciences, 2015, 10(5): 167-178.

[12] Dromantienė R, Pranckietienė I, Šidlauskas G, et al. The effect of Mg and S on photosynthesis products and nitrogen content in winter wheat[C]//Raupeļienė A. International Scientific Conference Rural Development. Lithuania: Aleksandras Stulginskis University, 2017: 42-46.

[13] El-Dissoky R A, Al-Kamar F A, Derar R M. Impact of magnesium fertilization on yield and nutrients uptake by maize grown on two different soils[J]. Egyptian Journal of Soil Science, 2017, 57(4): 455-466.

壤的修复效应与机理研究[J].水土保持学报,2009,23(1):111-116.

[12] 王美娥,彭驰,陈卫平.水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J].环境科学,2015,36(11):4283-4290.

[13] 王凯荣,张玉烛,胡荣桂.不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J].农业环境科学学报,2007,26(2):476-481.

[14] 甘国娟,刘妍,朱晓龙,等.3 种提取剂对不同类型土壤重金属的提取效果[J].中国农学通报,2013,29(2):148-153.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.

[16] Chen Z, Tang Y T, Yao A J, et al. Mitigation of Cd accumulation in paddy rice (*Oryza sativa* L.) by Fe fertilization[J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 549-559.

[17] 陈杰华,王玉军,王汉卫,等.基于 TCLP 法研究纳米羟基磷灰石对污染土壤重金属的固定[J].农业环境科学学报,2009,28(4):645-648.

[18] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等.钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J].农业环境科学学报,2014,33(5):890-897.

[19] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. Sorption and desorption of cadmium from some New Zealand soils: Effect of pH and contact time[J].Australian Journal of Soil Research,1998,36(2):199-216.

[20] Yang Y J, Chen J M, Huang Q N, et al. Can liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils[J].Chemosphere,2018,193:547-556.

[21] 张丽娜,宗良纲,沈振国.有机肥和生态肥对土壤中镉行为以及水稻生长的影响[J].土壤通报,2007,38(6):1182-1186.

[22] 吴曼,徐明岗,徐绍辉,等.有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):461-467.

[23] 李平,王兴祥,朗漫,等.改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J].中国环境科学,2012,32(7):1241-1249.

[24] 李冰,王昌全,李枝,等.Cd 胁迫下杂交水稻对 Cd 的吸收及其动态变化[J].生态环境学报,2014,23(2):312-316.

[25] 居学海,张长波,宋正国,等.水稻籽粒发育过程中各器官镉积累量的变化及其与基因型和土壤镉水平的关系[J].植物生理学报,2014,50(5):634-640.

(上接第 231 页)

[14] Chen J, Zheng M J, Pang D W, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J].Journal of Integrative Agriculture,2017,16(8):1708-1719.

[15] 张姗,杨四军,顾克军,等.施氮和秸秆还田对晚播小麦养分平衡和产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(9):2714-2720.

[16] 周建斌.作物营养从有机肥到化肥的变化与反思[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1686-1693.

[17] 谭德水,金继运,黄绍文,等.长期施钾及小麦秸秆还田对北方典型土壤固钾能力的影响[J].中国农业科学,2010,43(10):2072-2079.

[18] Yan B, Hou Y. Effect of soil magnesium on plants: A review[J].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2018,170(2):e022168.

[19] Sharma U, Paliyal S S, Sharma S P, et al. Effects of continuous use of chemical fertilizers and manure on soil fertility and productivity of maize-wheat under rainfed conditions of the Western Himalayas[J].Com-munications in Soil Science and Plant Analysis,2014,45(20):2647-2659.

[20] 丁玉川,焦晓燕,聂督,等.山西省主要类型土壤镁素供应状况及镁肥施用效果[J].水土保持学报,2011,25(6):139-143.

[21] 王飞,王建国,李林,等.施钙与覆膜栽培对缺钙红壤花生 Mg、Fe、Zn 吸收,积累及分配的影响[J].核农学报,2019,33(11):2261-2270.

[22] 王亮,李双异,汪景宽,等.长期施肥与地膜覆盖对棕壤交换性钙、镁的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(5):1200-1206.

[23] Geng Y H, Cao G J, Wang L C, et al. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution[J].PLoS One, 2019,14(7):e0219512.

[24] 李朝苏,谢瑞芝,黄钢,等.稻麦轮作区保护性耕作条件下氮肥对水稻生长发育和产量的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):528-535.