

陆志峰,任涛,鲁剑巍.我国冬油菜种植区土壤有效镁状况与油菜施镁效果[J].华中农业大学学报,2021,40(2):17-23.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.003

我国冬油菜种植区土壤有效镁状况与油菜施镁效果

陆志峰,任涛,鲁剑巍

华中农业大学微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室,武汉 430070

摘要 我国冬油菜主产区耕作土壤有效镁供应能力有限,近年来随着产量提高作物从土壤中带走的镁养分量大,而生产上普遍施用氮、磷、钾养分含量高的化肥从而导致随施肥带入的镁养分极少,镁营养缺乏逐渐成为限制油菜产量的潜在因子。为全面评价冬油菜种植区土壤有效镁丰缺状况与油菜施镁效果,本文系统梳理了油菜镁营养研究的主要进展,在揭示油菜需镁量大($Mg\ 20\sim 40\ kg/hm^2$)、我国冬油菜主产区土壤缺镁问题突出(土壤有效镁平均含量为 $225.7\ mg/kg$,其中低于 $200.0\ mg/kg$ 的土壤占 53.7% ,处于缺乏或潜在缺乏状态)和施镁大幅度增产(平均增产效果大于 15%)的基础上,提出了镁是我国冬油菜种植中继氮、磷、钾、硼后第5种需要通过施肥方式进行补充的必需营养元素,并为冬油菜生产上镁肥的科学管理提供了建议。

关键词 冬油菜;土壤有效镁;配合施肥;施镁效果;镁养分管理;长江流域;营养调控;专用缓控释肥料;轻简施肥

中图分类号 S 565.4;S 143.7⁺2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0017-07

油菜是我国重要的油料作物,发展油菜生产对保障国家粮油安全至关重要^[1]。近60年来我国油菜产业快速发展,在高产优质品种应用、中低产田改良、科学施肥、病虫草害综合防控、机械化水平提升、栽培技术进步等多重技术的推动下,油菜籽单产从20世纪60年代的 $360\ kg/hm^2$ 增加到2019年的 $2\ 048\ kg/hm^2$ ^[2]。施肥在油菜籽粒产量提高中的平均贡献率高达 42.5% ,其中施用氮肥的贡献率最大,其次是磷肥和钾肥^[3-4]。除大量元素外,油菜对缺硼敏感,施硼平均增加油菜籽粒产量 19.2% ^[5]。针对我国油菜种植区整体立地条件较差、土壤养分缺乏种类多的生产现状,科研工作者在摸清高产油菜的氮、磷、钾、硼营养特性和主产区土壤相应的养分供应状况的基础上,研究集成了油菜氮、磷、钾、硼肥配合施用技术体系并有针对性研发了一些轻简高效的技术物化产品^[6-8],为我国油菜绿色高效生产提供了强有力的支撑。尽管油菜养分管理技术取得了一定的进步,但长期高浓度氮、磷、钾肥的施用,在提升油菜籽产量的同时也增加了随作物收获带走的中微量元素(如镁),加上缺乏有针对性的施肥管理措施,油菜中微量元素缺乏的现象日益突显并逐渐成为限制

油菜产量的重要因子。

镁是油菜生长发育所必需的营养元素,在提高作物产量、改善品质和提升抗逆性上发挥着重要作用^[9-10]。我国油菜种植区尤其是长江流域及其以南的冬油菜生产省份,土壤有效镁含量低,有 50% 的土壤需要不同程度补充镁肥^[11-12]。镁很有可能是油菜种植上除氮、磷、钾、硼外另一种需要通过施肥的方式进行补充的养分。相比于大量元素,油菜镁营养的研究起步较晚、进展相对缓慢,不过最近几年陆续有关于油菜镁营养特性^[13]、典型种植区土壤有效镁状况^[12,14]、油菜施镁效果^[10,15]的研究报道。系统梳理我国油菜种植区土壤有效镁丰缺状况、油菜需镁规律以及综合评价镁肥的施用效果,有助于明确油菜生产上潜在的镁营养缺乏问题,为进一步凝练施镁技术,并将其融入到以绿色高产、轻简高效为主要目标的油菜生产中提供必要的理论和技术支撑。本文汇总了现有的主要文献资料,以土壤供镁和油菜需镁规律以及镁肥施用的增产效果为主要依据,初步制定了油菜镁营养调控策略,并结合油菜轻简高效生产需求提出了技术物化产品(如含镁的油菜专用缓控释肥)研发方案。

收稿日期:2021-02-05

基金项目:国家油菜产业技术体系专项(CARS-12);国际镁营养研究所合作项目(IMI2018-02)

陆志峰, E-mail:zhifenglu@mail.hzau.edu.cn

通信作者:鲁剑巍, E-mail:lunm@mail.hzau.edu.cn

1 冬油菜种植区土壤有效镁状况及缺乏原因分析

我国油菜常年种植面积稳定在 700 万 hm^2 左右,其中约 90% 分布在长江流域及其以南的省份^[2]。该区域气候温暖、雨量较多,土壤侵蚀和淋洗程度较高,供肥和保肥能力较差,且以一年两熟或三熟的高强度轮作模式为主,养分带走量大,最终导致了区域土壤肥力水平总体不高的现状。自 20 世纪 90 年代开始,陆续有研究对我国典型土壤、农作物种植区以及全国的土壤有效镁状况进行了评估。2000 年黄鸿翔等^[16]对南方五省(区)(江西、广西、广东、湖南和海南)红壤地区土壤镁素状况的调查发现,有 61.9% 的调查样本($n=126$)土壤有效镁含量低于 20 mg/kg ,土壤供镁能力低。通过分析全国 31 省份共 17 790 个土壤样品的有效镁含量,白由路等^[11]指出我国土壤有效镁平均含量为 320.6 mg/kg ,呈北高南低的分布趋势,其中有 54.0% 的土壤需要不同程度地补充镁肥,且主要分布在长江以南地区,如福建、江西、广东、广西、贵州、湖南和湖北等省区。为准确评估冬油菜主产区土壤镁的丰缺状况,邹娟^[14]根据第二次全国土壤普查制定的养分分级标准,分析了 2004—2008 年间 10 个油菜主产省份的土壤样品,明确缺镁土壤(有效镁含量 $<100 \text{ mg/kg}$)的占比为 5.6% ($n=272$)。根据任涛等^[12]的研究结果,2018 年冬油菜种植区土壤有效镁平均含量为 225.7 mg/kg ,其中低于 100 mg/kg 的土壤样本点占 24.2% ($n=430$),是 2004—2008 年的 4.3 倍,主要集中在湖南南部、江西和广西北部等区域;另有 29.5% 的土壤有效镁含量在 100~200 mg/kg 内,处于潜在缺乏状态,需要补充一定量的镁肥才能保证油菜不减产。结果说明,在过去的 10 年间,长江流域冬油菜典型种植区缺镁土壤的比例进一步扩大。研究同时表明,不同区域油菜种植土壤有效镁含量有所不同,长江下游土壤有效镁含量高于长江上游和中游^[12]。由此可见,我国冬油菜主产区土壤有效镁含量不容乐观,土壤供镁能力有限,缺镁和潜在缺镁的土壤面积分布广且总体呈扩大的趋势,加上农民在油菜生产过程中基本不施用镁肥,油菜缺镁问题日益严重。

油菜种植区土壤镁含量受区域土壤和生态气候条件、种植制度及生产管理措施等的综合影响。土壤中镁离子具有较大的水合半径,与土壤胶体的黏

合力低,钾、钙、氢等其他阳离子能够竞争土壤胶体表面的结合位点,从而增加镁离子的淋洗风险^[17-18]。在农田生态系统中,镁的淋洗量可以达到 20~50 kg/hm^2 ^[19-22],且受到土壤质地、土壤理化性质、降雨量等的影响。一般认为,土壤质地较轻、pH 和阳离子交换量较低以及环境降雨量较大的区域,土壤中水溶性镁的淋溶损失更为严重^[21-22]。长江流域及其以南冬油菜种植区年平均降雨量在 800 mm 以上,土壤 pH 和阳离子交换量较低^[10],土壤镁的淋洗风险较大。另外,稻-油轮作是冬油菜生产区域的主要种植制度,作物(油菜和水稻)周年镁素带走量在 50~80 kg/hm^2 ^[15,23-24],并且随着作物单产水平的逐渐提高,有进一步增加的趋势。尽管如此,在实际生产中农民普遍重视氮、磷、钾肥而忽略镁肥的施用,加上肥料结构的调整(如我国磷肥产品中磷铵约占 80%,已基本取代含钙、镁、硫的过磷酸钙和钙、镁、磷肥),使土壤镁长期处于输出状态,这也是近十多年来油菜种植区缺镁土壤面积持续扩大的主要原因。

2 镁营养积累特征与不同生育期缺镁症状

冬油菜一般于 9—10 月播种,次年 5 月左右收获,是典型的越冬作物。冬季气温较低,油菜生长缓慢,苗期(0~130 d)干物质累积量仅占全生育期总量的 27.1% (图 1A)。抽薹至角果期,油菜生长速度加快,最大干物质累积速率达 151 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,角果期时干物质累积量最大,为 1.4 t/hm^2 左右。油菜镁累积量因品种、栽培方式、生态种植区及土壤有效镁含量的不同而表现出较大差异,一般分布在 20~40 kg/hm^2 范围内^[10,13,15,24]。冬油菜镁的积累特征与干物质的变化规律类似,苗期镁的吸收量占全生育期总量的 35%,蕾花期占 45%,角果期占 20% (图 1B)。苗期植株镁主要集中在绿叶中,进入生殖生长期后,绿叶和茎秆中的镁快速转移,215 d 时绿叶、茎秆和根系镁的累积量相比于最大值分别降低了 67.9%、8.9% 和 8.4%。落叶中镁的累积量自蕾薹期开始逐渐增加,角果期时达最大值,有 30% 左右的镁会随落叶重新归还到土壤中。在仅考虑活体镁累积的情况下,花后根系吸收的镁贡献了最大镁累积量的 63%,可见花后镁的充足供应对保障油菜高产稳产非常关键。

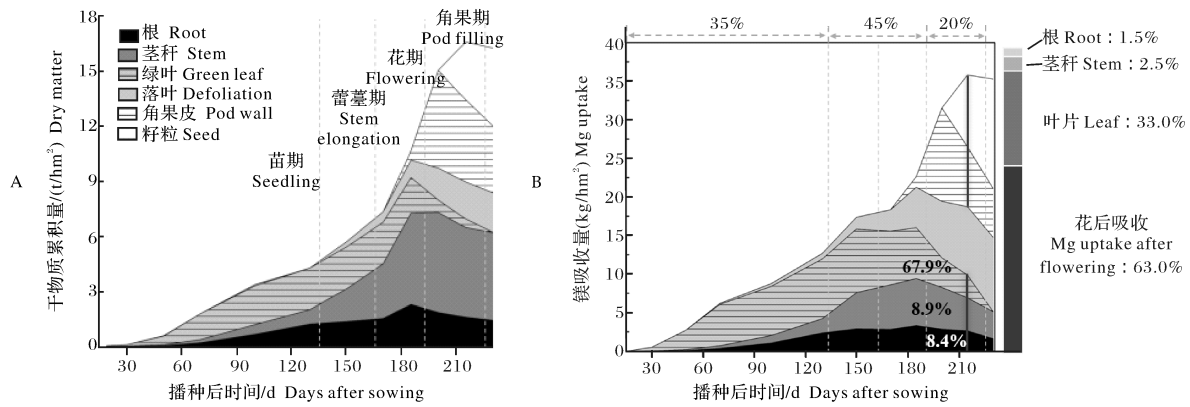


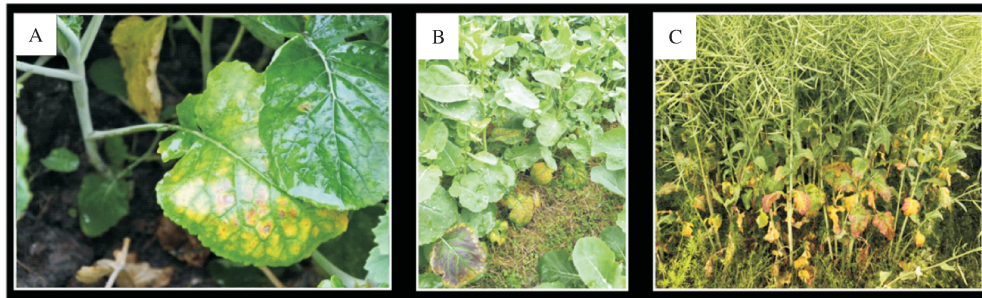
图 B 顶部灰色数值表示苗期、蕾花期和角果期植株吸镁量占全生育期镁累积总量的比例；黑色竖线对应镁累积最大值，黑色和白色数值则表示至植株镁累积最大值时叶片(67.9%)、茎秆(8.9%)和根系(8.4%)镁的下降比例(相比于各器官最大累积量)；柱形条码表示根系、茎秆和叶片转移的镁与植株花后吸收的镁对活体最大镁累积量的贡献。The grey values at the top of figure B indicate the proportion of Mg uptake at seedling, stem elongation to flowering, and pod filling stages to the total accumulated Mg. The black vertical line represents the maximum Mg uptake, and the black and white values indicate the reduction ratio of Mg in leaves (67.9%), stems (8.9%) and roots (8.4%). The bar code denotes the relative contribution of the Mg transferred from roots, stems, and leaves as well as the Mg absorbed after flowering to the maximum Mg accumulation *in vivo*.

图 1 油菜不同器官干物质(A)和镁累积(B)动态变化规律(参照刘晓伟等^[13])

Fig.1 Dynamics of dry matter accumulation(A) and Mg uptake (B) in different organs of rapeseed

油菜对镁缺乏敏感,在不同生育阶段均容易缺镁(图 2),表现为叶片脉间失绿黄化,严重时呈现紫红色斑块,叶片枯萎、过早脱落。镁在植物体内移动性强,因而镁缺乏一般先从老叶开始,然后再逐渐扩展到中部叶片^[25-26];在作物快速生长期,因镁的吸收和植株体内镁的转移再利用能力有限,缺镁也可能出现在最新的完全展开叶,该过程与低镁含量的新

叶长期暴露于高光照条件下而易于遭受光氧化损伤有关^[27-28]。准确快速的植株镁丰缺诊断是进行缺镁矫正的基础,用叶片缺镁症状来衡量植株镁状态往往存在滞后性,所以在镁营养诊断时建议借助叶片镁含量来判断,当油菜叶片镁含量小于 0.1%~0.2%时容易表现出缺镁,此时应采取叶片喷镁或与土壤施镁相结合的方法进行补充^[29-31]。同时,应考



A、B、C 分别表示苗期、蕾花期和角果期油菜缺镁典型症状。A, B and C represent the typical Mg deficiency symptoms during seedling, stem elongation and pod filling stage.

图 2 不同生育期油菜缺镁症状^[10]

Fig.2 Occurrence of typical chlorosis symptoms of Mg deficiency during different growing stages

考虑土壤中钾、钙等阳离子与镁离子间的拮抗竞争可能导致的油菜生理性缺镁问题,在这种情况下,采用叶片喷镁的效果更佳。

3 施镁对油菜籽产量的影响

土壤有效镁含量低影响油菜生长和产量,及时

补充镁肥是保证油菜高产的重要措施。对已报道文献中涉及我国冬油菜种植区施镁效果的 70 组数据进行对比分析,结果表明施镁处理油菜平均产量为 1 765 kg/hm²,比不施镁处理增加 18.6%;其中有 74.6%的试验施镁后籽粒增产 10%以上(图 3A)。施镁效果较好的点大多分布在土壤镁含量相对较低

的省份,如湖南、江西、湖北等;另有部分试验点因土壤中较高的钾和钙降低了土壤镁的有效性,并最终导致油菜吸镁的生理性障碍,如云南寻甸土壤有效钾和有效钙的含量分别为 279.5 mg/kg 和 5 250 mg/kg,而有效镁含量仅为 28.1 mg/kg,因钾、钙离子与镁离子的吸收存在拮抗作用,油菜根系吸收土壤中镁的难度增加,施镁增产效果显著^[10]。据此可以推断,在冬油菜种植区尤其是土壤镁含量较低的区域,施镁大范围显效。

充足的镁营养有助于优化油菜的产量构成因

子,一定程度上提高植株密度、角果数和角粒数,如基施镁肥后,油菜角果数平均增加了 27.7%(图 3B)。田贵生等^[15]在基施镁肥的基础上于终花期喷施 0.5% 硫酸镁,油菜籽粒产量相比于喷自来水处理增加了 2.7%~9.4%,且在基施镁肥用量越低的情况下增产效果越好。与土壤施镁增产的原因有所不同,叶面喷镁主要通过增加角粒数和千粒重来提高籽粒产量。此外,较多的研究表明施镁有助于促进植株对氮、磷元素的吸收,加速植株体内氮的同化和利用^[10,32-33],这也可能是施镁提高油菜产量的一个原因。

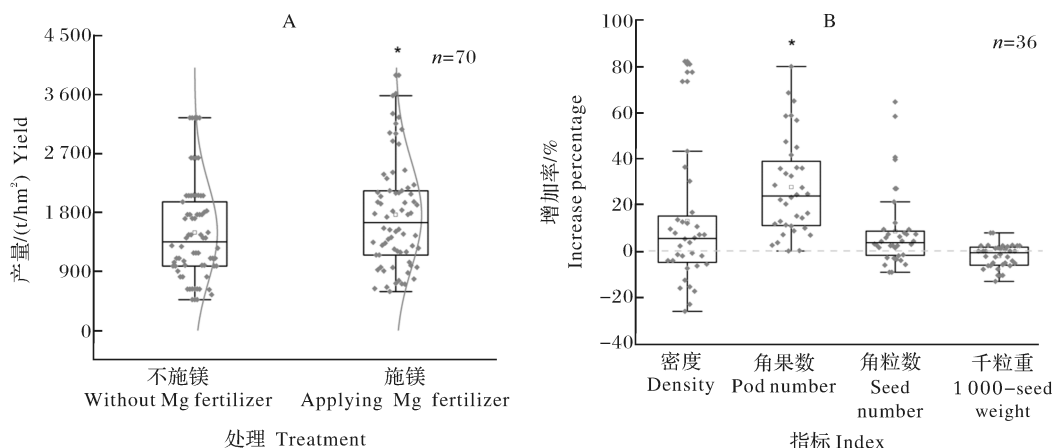


图 A 共包含施镁与不施镁的对比数据 70 组^[10,15,34-38];图 B 共包含施镁与不施镁的对比数据 36 组^[10,15,38]。箱型框中横线和正方形分布表示数据集的中值和平均值,上下边界分别表示数据集的 25% 和 75% 点位,上下水平短线表示数据集的 10% 和 90% 点位。灰色菱形(图 A 和 B)和曲线(图 A)表示数据点分布,* 表示施镁与不施镁处理间角果数差异达 5% 显著水平。Figure A contains 70 comparative sets of data with and without applying Mg, while Figure B contains 36 comparative sets of data with and without applying Mg. Horizontal line and open square inside each box plot represent median and mean values, respectively. The upper and lower box edges indicate 25% and 75% percentiles of dataset, the upper and lower short lines outside box denote the 10% and 90% percentiles of dataset. The grey diamonds (Figures A and B) and the fitted curve (Figure A) indicate the distribution of data points. * indicate that the pod number is significantly different between the without Mg and applying Mg treatments.

图 3 施镁对油菜籽粒产量和产量构成因子的影响

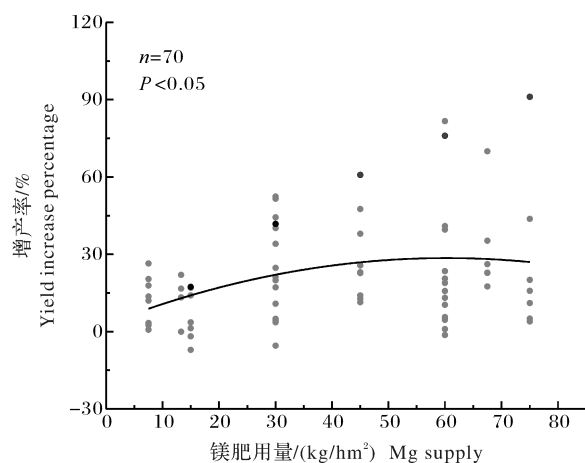
Fig.3 Rapeseed yield and its components as affected by Mg application

施镁处理油菜籽粒增产率与镁肥用量间存在显著相关性(图 4),随镁肥用量的增加,施镁处理油菜籽粒增产率显著增加,当氧化镁用量为 45 kg/hm² 时,平均增产效果最好;镁肥用量继续增加,籽粒增产率趋于稳定。所以,在生产上施用 MgO 45 kg/hm² 基本上可满足大部分区域油菜生长所需。但对于部分土壤严重缺镁的区域,应适当增加施镁量,如湖南安仁试验点(土壤有效镁含量为 20.7 mg/kg)施镁处理增产率随镁肥用量的增加而线性增加(图中黑色圆点),当施镁量达到 75 kg/hm² 时,增产率最大;而对于土壤有效镁含量较高的生产区,镁肥用量应适当降低。作物施镁量随土壤有效镁含量、土壤中钾、钙等其他阳离子含量以及作物产量水

平等的不同而表现出差异^[39-40],未来的研究需以土壤有效镁丰缺状况为基础,充分衡量土壤供镁与作物需镁之间的关系,实现作物-土壤-肥料的协调和同步。

4 冬油菜镁养分管理建议

我国冬油菜种植区土壤有效镁含量总体偏低,其中一半以上土壤缺镁或潜在缺镁,同时油菜需镁量高(20~40 kg/hm²),多点施镁试验和大面积施镁示范表明增产效果显著(>15%),基本明确镁是继氮、磷、钾、硼后第 5 种普遍需要通过施肥的方式进行补充的营养元素。然而,目前从事油菜生产的农民甚至是基层农技推广人员对油菜镁营养的认识



图中灰色和黑色(湖南安仁点)点表示不同镁肥用量下油菜籽粒增产率^[10,15,34-38], $P<0.05$ 表示籽粒增产率与镁肥用量间相关性达显著水平。The grey and black (Anren, Hunan) points indicate the percentage increase of seed; The data was fitted by polynomial regression significant ($P<0.05$).

图4 镁肥用量与油菜籽粒增产率之间的关系

Fig.4 Relationship between Mg application rate and percentage yield increment

普遍不足,而油菜养管理上缺乏有效的镁肥调控策略和相应的技术产品,迫切需要开展和深化油菜镁营养研究,同时需要对油菜施镁增产增收效果及施镁技术进行大力宣传,着力将镁肥纳入到油菜养分综合管理技术体系中。

通过系统梳理油菜镁营养研究进展,总结出镁肥管理建议如下:(1)推荐冬油菜镁肥施用量为 $\text{MgO } 45 \text{ kg/hm}^2$ 左右,作为基肥施用;在土壤有效镁含量较低($<50 \text{ mg/kg}$)的区域,应该适当加大用量,或采用基施镁肥与蕾花期叶面喷镁相结合的方式。(2)镁肥品种方面,硫酸镁为基施镁肥首选品种,其次是氯化镁或白云石^[41];蕾花期叶面肥建议用0.5% MgSO_4 喷施1~2次。

由于油菜镁营养研究有限,镁肥应用还不普遍,未来应在下列几个方面加大力度开展研究和应用工作:(1)进一步开展土壤供镁能力评估以及镁营养调控油菜产量和品质形成的规律研究;(2)结合土壤供镁和油菜需镁特征,建立油菜镁营养的丰缺指标体系,明确不同土壤有效镁含量下的施镁效果并构建相应的施用技术;(3)推进和完善油菜专用缓控释肥料配伍建设,筛选最佳的镁肥形态和配比,熟化镁肥添加工艺,加速镁肥轻简高效施用技术研发;(4)有效开展镁营养知识普及,加快冬油菜施镁技术的推广应用。

参考文献 References

- [1] 王汉中,以新需求为导向的油菜产业发展战略[J].中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.WANG H Z.New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J].Chinese journal of crop sciences,2018,40(5):613-617 (in Chinese with English abstract).
- [2] 中华人民共和国统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2020.National Bureau of Statistics of the People's Republic of China.China statistical yearbook [M].Beijing:China Statistics Press,2020(in Chinese).
- [3] 徐华丽.长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究[D].武汉:华中农业大学,2012.XU H L. Investigation on fertilization and effect of formulated fertilization of winter rapeseed in Yangtze River Basin [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2012 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李慧.中国冬油菜氮磷钾肥施用效果与推荐用量研究[D].武汉:华中农业大学,2015.LI H. Fertilization effect and fertilizer recommendation of nitrogen,phosphorus and potassium on the winter oilseed rape of China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2015 (in Chinese with English abstract).
- [5] 邹娟,鲁剑巍,廖志文,等.湖北省油菜施硼效果及土壤有效硼临界值研究[J].中国农业科学,2008,41(3):752-759.ZOU J, LU J W, LIAO Z W, et al. Study on response of rapeseed to boron application and critical level of soil available B in Hubei Province [J]. Scientia agricultura sinica,2008,41(3):752-759 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘晓伟,鲁剑巍,李小坤,等.直播冬油菜干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J].中国农业科学,2011,44(23):4823-4832.LIU X W, LU J W, LI X K, et al. Dry matter accumulation and N,P,K absorption and utilization in direct seedling winter oilseed (*Brassica napus* L.) [J]. Scientia agricultura sinica, 2011,44(23):4823-4832 (in Chinese with English abstract).
- [7] 陈鹏.油菜长效专用配方肥施用效果研究[D].武汉:华中农业大学,2016.CHEN P. Study on application efficiency of long-acting special formula fertilizer for rapeseed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2016 (in Chinese with English abstract).
- [8] 鲁剑巍,任涛,丛日环,等.我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J].中国油料作物学报,2018,40(5):712-720.LU J W, REN T, CONG R H, et al. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China [J]. Chinese journal of oil crop sciences,2018,4(5):712-720 (in Chinese with English abstract).
- [9] GERENDÁS J, FUHR S H. The significance of magnesium for crop quality [J]. Plant and soil,2013,368:101-128.
- [10] GENG G T, CAKMAK I, REN T, et al. Effect of magnesium fertilization on seed yield, seed quality, carbon assimilation and nutrient uptake of rapeseed plants [J/OL]. Field crops research,2021,264(46):108082[2021-02-05]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108082>.

- [11] 白由路,金继运,杨俐苹.我国土壤有效镁含量及分布状况与含镁肥料的应用前景研究[J].土壤肥料,2004(2):3-5. BAI Y L, JIN J Y, YANG L P. Study on the content and distribution of soil available magnesium and foreground of magnesium fertilizer in China [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2004 (2):3-5 (in Chinese with English abstract).
- [12] 任涛,郭丽璇,张丽梅,等.我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析[J].中国农业科学,2020,53(8):1606-1616. REN T, GUO L X, ZHANG L M, et al. Soil nutrient status of oilseed rape cultivated soil in typical winter oilseed rape production regions in China [J]. Scientia agricultura sinica, 2020, 53(8): 1606-1616 (in Chinese with English abstract).
- [13] 刘晓伟,鲁剑巍,李小坤,等.直播冬油菜钙、镁、硫养分吸收规律[J].中国油料作物学报,2012,34(6):638-644. LIU X W, LU J W, LI X K, et al. Absorption characteristics of calcium, magnesium and sulfur by winter rapeseed (*Brassica napus* L.) under direct-seedling cropping system [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2012, 34(6): 638-644 (in Chinese with English abstract).
- [14] 邹娟.冬油菜施肥效果及土壤养分丰缺指标研究[D].武汉:华中农业大学,2010. ZOU J. Study on response of winter rapeseed to NPKB fertilization and abundance & deficiency indices of soil nutrients[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [15] 田贵生,陆志峰,任涛,等.镁肥基施及后期喷施对油菜产量与品质的影响[J].中国土壤与肥料,2019(5):85-90. TIAN G S, LU Z F, REN T, et al. Effects of spraying magnesium on the yield and quality of oilseed rape under different magnesium fertilizer application rates[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2019 (5):85-90 (in Chinese with English abstract).
- [16] 黄鸿翔,陈福兴,徐明岗,等.红壤地区土壤镁素状况及镁肥施用技术的研究[J].土壤肥料,2000(5):19-23. HUANG H X, CHEN F X, XU M G, et al. Study on soil magnesium status and magnesium fertilizer application technology in red soil area [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2004, (2):3-5 (in Chinese).
- [17] 丁玉川.水稻镁营养特性及镁钾营养互作效应研究[D].南京:南京农业大学,2007. DING Y C. Characteristic of magnesium nutrition and interactive effects of magnesium and potassium in rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [18] GRANSEE A, FUHRS H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions [J]. Plant and soil, 2013, 368(1/2):5-21.
- [19] JAKOBSE N. Leaching of nutrients from pots with and without applied compost [J]. Resource, conservation and recycling, 1996, 17:1-17.
- [20] YLARANTA T, UUSIKAMPPA J, JAAKKOLA A. Leaching of phosphorus, calcium, magnesium and potassium in barley, grass and fallow lysimeters [J]. Acta agriculturae scandinavica, section B-soil and plant science, 1996, 46:9-17.
- [21] GRZEBISZ W. Magnesium food and human health [J]. Journal of elemntology, 2011, 16:299-323.
- [22] 李丹萍,刘敦一,张白鸽,等.不同镁肥在中国南方三种缺镁土壤中的迁移和淋洗特征[J].土壤学报,2018,55(6):1513-1524. LI D P, LIU D Y, ZHANG B G, et al. Movement and leaching of magnesium fertilizers in three types of magnesium-deficient soils in south China relative to fertilizer type [J]. Acta pedologica sinica, 2018, 55(6): 1513-1524 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杨文祥,王强盛,王绍华,等.镁肥对水稻镁吸收与分配及稻米食味品质的影响[J].西北植物学报,2006,26(12):2473-2478. YANG W S, WANG Q S, WANG S H, et al. Effects of Mg fertilization on Mg uptake and partition by rice and rice cooking quality [J]. Acta botanica sinica, 2006, 26(12): 2473-2478 (in Chinese with English abstract).
- [24] 邹娟,鲁剑巍,吴江生,等.4个双低甘蓝型油菜品种钙、镁、硫吸收动态[J].华中农业大学学报,2009,28(3):295-299. ZOU J, LU J W, WU J S, et al. Dynamics of calcium, magnesium and sulfur uptake in 4 double-low rapeseed (*Brassica napus* L.) varieties [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2009, 28(3): 295-299 (in Chinese with English abstract).
- [25] CAKMAK I, YAZICI A M. Magnesium: a forgotten element in agricultural production [J]. Better crops, 2010, 94:23-25.
- [26] 鲁剑巍,李荣,王笋,等.油菜常见缺素症状图谱及矫正技术[M].北京:中国农业出版社,2010. LU J W, LI R, WANG Z, et al. Nutrient deficiency symptoms in rapeseed and corresponding fertilization techniques [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese).
- [27] CAKMAK I, KIRBY E A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage [J]. Physiologia plantarum, 2008, 133:692-704.
- [28] TRÄNKNER M, TAVAKOL E, JÁKLI B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection [J]. Physiologia plantarum, 2018, 163:414-431.
- [29] MARSCHNER H. Mineral nutrition of higher plants [M]. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [30] 汪洪,褚天铎.植物镁素营养诊断及镁肥施用[J].土壤肥料,2000(4):4-8. WANG H, CHU T D. Nutrition diagnosis of magnesium in plants and application of magnesium fertilizer [J]. Soils and fertilizers, 2000(4):4-8 (in Chinese with English abstract).
- [31] HAUER-JÁKLI M, TRÄNKNER M. Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: a systematic review and meta-analysis from 70 years of research [J]. Frontiers in plant science, 2019, 10:766.
- [32] GRZEBISZ W. Crop response to magnesium fertilization as affected by nitrogen supply [J]. Plant and soil, 2013, 368:23-39.
- [33] JEZEK M, GEIFUS C M, MÜHLING K H. Glutamine synthetase activity in leaves of *Zea mays* L. as influenced by magnesium status [J]. Planta, 2015, 242:1309-1319.

- [34] 廖兴其. 稻-稻-油三熟对钾、镁肥的反应[J]. 土壤, 1988(3): 153-155. LIAO X Q. Responses of rice-rice-rapeseed rotation system to potassium and magnesium fertilizers [J]. Soils, 1988 (3): 153-155 (in Chinese).
- [35] 郑圣先, 罗成秀, 戴平安, 等. 钾镁相互作用对油菜产量和养分吸收的影响[J]. 湖南农业科学, 1989(2): 29-32. ZHENG S X, LUO C X, DAI P A, et al. Effects of interaction between potassium and magnesium on rapeseed yield and nutrient absorption [J]. Hunan agricultural sciences, 1989(2): 29-32 (in Chinese).
- [36] XIE J C, DU C L, MA M T. Effects of magnesium fertilizer on crops in south China [J]. Better crops, 1995, 79: 24-25.
- [37] 李小芳, 李倩, 雷利琴, 等. 高钾地力下不同镁肥用量对油菜产量和品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2018(8): 48-50. LI X F, LI Q, LEI L Q, et al. Effects of magnesium application rates on yield and quality of rapeseed under high potassium soil fertility [J]. Hunan agricultural sciences, 2018(8): 48-50 (in Chinese with English abstract).
- [38] 叶晓磊, 周雄, 邵文胜, 等. 两种镁肥在直播冬油菜上的施用效果比较[J]. 中国农技推广, 2019, 35(S1): 123-125. YE X L, ZHOU X, SHAO W S, et al. Comparing the effects of two magnesium fertilizers on direct sowing rapeseed [J]. China agricultural technology extension, 2019, 35(S1): 123-125 (in Chinese).
- [39] BOGDEVICH I M, MISHUK O. Efficiency of magnesium and sulfur-containing fertilizers application for spring rape on sod-podzolic light loamy soil with different magnesium content [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus: agrarian sciences series, 2006, 2: 68-72.
- [40] WANG Z, HASSAN M U, NADEEM F, et al. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis [J/OL]. Frontiers in plant science, 2020, 10: 1727[2021-02-05]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>.
- [41] 田贵生. 油菜-水稻轮作周年种植施镁效果与镁养分平衡初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. TIAN G S. Preliminary study of effect of magnesium fertilizer and magnesium nutrient balance in rapeseed-rice rotation annual planting [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).

Soil available magnesium status and effects of magnesium application on rapeseed yield in main producing area of China

LU Zhifeng, REN Tao, LU Jianwei

Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China

Abstract The soil available magnesium (Mg) is typically low in the main producing area of rapeseed. In recent years, Mg deficiency is becoming a potential factor limiting rapeseed yield due to the unbalance between large removal of Mg under high productivity cropping system and less input under current nutrient management that prioritizing the application of nitrogen, phosphorus and potassium. On the purpose to comprehensively evaluate the soil Mg status and the effects of Mg application on seed yield, the present review summarized the main progress of Mg nutrition research in rapeseed plants. It is indicated that rapeseed requires 20-40 kg/hm² Mg for better growth and a large area of soils in the main producing area lack sufficient available Mg (the average value of soil available Mg is 225.7 mg/kg, of which 53.7% of the soils is less than 200.0 mg/kg, in a state of Mg deficiency). The application of Mg fertilizer greatly improves seed yield by more than 15%. Mg is proposed to be the fifth essential element following nitrogen, phosphorus, potassium and boron, and to be supplemented by fertilization. It will provide suggestions for the scientific management of Mg fertilizer in winter rapeseed production. For better rapeseed production, we also propose recommendations for Mg fertilizer.

Keywords winter rapeseed; soil available Mg; integrated fertilization; effects of Mg on rapeseed yield; Mg nutrient management; the Yangtze River Basin; nutritional manipulation; special slow releasing fertilizer; simplified fertilization

(责任编辑: 赵琳琳)