

不同镁肥在中国南方三种缺镁土壤中的迁移和淋洗特征*

李丹萍¹ 刘敦一^{1,2} 张白鸽³ 杨敏¹ 李文丽¹ 石孝均^{1,2,4}
陈新平^{1,2} 张跃强^{1,2,4†}

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

(2 西南大学农业科学研究院, 重庆 400716)

(3 广东省农业科学院蔬菜研究所, 广州 510640)

(4 国家紫色土肥力与肥料效益监测基地, 重庆 400716)

摘要 镁淋溶是导致南方土壤缺镁的关键因素之一。通过室内土柱模拟实验探究了四种镁肥（氧化镁、改性硫酸镁、钙镁磷肥和硫酸钾镁）在中国南方三种酸性缺镁土壤（黄壤、紫色土、红壤）中的有效性、迁移和淋洗特征以及土壤对镁素的固持，以为南方缺镁土壤科学施用镁肥提供依据。结果表明，施用镁肥（折合 MgO 100 mg kg⁻¹）后，三种土壤施镁土层（0~15 cm）交换性镁含量提高了 2 倍~15 倍。氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁在三种土壤中均表现出较强的迁移能力，经过 60 d 淋洗（模拟降雨量 1 000 mm），未施用镁肥土层（15~50 cm）中有效镁含量均较对照增加 17.9~105.4 mg kg⁻¹。黄壤上不同镁肥处理镁累积淋失量在 104.9~243.8 kg hm⁻²，与紫色土接近，但较红壤高 2 倍~3 倍。实验结束后，黄壤和紫色土上施用氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁的淋失率均超过三分之一，而红壤中均低于 7%；施用钙镁磷肥增加了土壤对镁的固持，减缓了镁向下淋洗，淋失率在三种土壤中均为负值。综合四种镁肥在土壤中的有效性、土壤对镁素的固持、镁在土壤中的淋洗特征以及土壤酸化阻控，钙镁磷肥在三种酸性缺镁土壤中施用效果均较好。

关键词 镁肥种类；酸性土壤；迁移；淋失；固持；钙镁磷肥

中图分类号 S143.72 **文献标识码** A

镁是植物光合作用所必需的矿质营养元素，约占植物干重的 0.05%~0.7%。不同植物对镁的需求量不同，水稻、小麦等禾本科作物需镁较少，茶、烟等叶用作物需镁较多^[1]。同时，植物各器官中镁含量高低也有差异，通常情况下，种子最高，茎、叶次之，根系最少^[2]。作物缺镁将导致作物的光合作用减弱甚至中断，造成作物减产、品质降低等后果^[3]。

植物体中的镁主要来源于土壤。白由路等^[4]对全国土壤的有效镁含量进行了调查，结果表明，我国土壤有效镁含量基本上呈北高南低的趋势，其中，有 54% 的土壤镁含量偏低（低于 120 mg kg⁻¹），需要施用镁肥，并主要分布在我国南方。镁在农业土壤中的去向主要包括作物带走、土壤固持、淋失损失^[5]以及地表径流^[6]，但有关各去向的定量研究较少。从化学特性而言，与钾、钙及铵离子相比，镁原子半径小但水合半径大，这导致土壤对镁的结合能力相对较弱而在土壤中的移动性更强^[5]。Ylaranta 等^[7]研究不同土地利用方式下不同质地土壤镁素淋失时发现，镁淋失总量平均达 136 kg hm⁻²，而被植物吸收带走的镁量平均为 40

*国家重点研发计划项目（2016YFD0200104）、国家科技支撑计划项目（2015BAD06B04）及国际镁营养研究所基金资助
† Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0800304), the National Key

作者简介：李丹萍（1991—），女，河南项城人，硕士研究生，主要从事土壤肥力研究。E-mail: lidanping2015@163.com
收稿日期：2018-02-13；收到修改稿日期：2018-07-02；优先数字出版日期（www.cnki.net）：

kg hm⁻²。在波兰开展的研究监测了农田小流域径流中镁的周年排放,受降雨量、排灌系统和施肥强度的影响每年径流排放的镁有 4.8~41.6 kg hm⁻² [8]。尽管相关文献较少,但这些结果足以说明作物镁素营养管理必须考虑镁在土壤中的迁移和淋洗特征。

不同类型的镁肥在不同土壤中的迁移和淋洗特征不同。有研究表明, Mg²⁺的淋失量随降雨量的增加而增加,降雨量大是造成热带地区红壤镁素贫乏的重要原因 [9]。我国南方地区温度高、雨热同季,土壤长期受到强烈的风化淋溶侵蚀,土壤溶液中的盐基离子如钙、镁等极易发生淋失 [10],致使土壤中含镁量严重不足,导致土壤养分元素不平衡,影响作物产量和品质 [11]。实际生产中,人们通过施用镁肥来增加土壤有效镁含量进而矫正作物缺镁,然而不同镁肥类型对镁淋失也有很大影响。李延等 [12]利用氯化镁、硫酸镁以及钙镁磷肥对山地龙眼园土壤镁素淋失特点进行模拟研究,结果表明,三种镁肥相比较,氯化镁处理 Mg²⁺的淋失量分别为钙镁磷肥和硫酸镁的 2.32 倍和 1.50 倍。土壤镁淋失除与降雨量、镁肥施用 [13]等因素有关外,不同类型的土壤质地对土壤镁淋失也有重要影响。陈海均等 [14]在三种不同质地的土壤上通过滴施不同浓度的硫酸镁溶液研究土壤质地对镁移动分布的影响,发现黏粒含量较高的土壤具有较高的吸附量,而在通透性较好的壤土,滴施镁肥后 Mg²⁺容易随灌溉水向下运动,淋失量增大 [15]。由此看出,土壤质地较轻,土壤交换性镁容易淋失,而质地黏重的土壤交换性镁则易累积 [16]。

综合国内外文献可知,目前国内外关于镁素研究主要集中在镁的营养生理、镁肥效应以及各淋失因素对镁素在土壤中迁移的影响,而有关不同镁肥在不同土壤中的淋溶特征研究较少,不利于生产实践中镁肥类型的正确选择。我国南方地区高温多雨,土壤淋溶是土壤和作物缺镁的关键因素之一 [17]。因此,明确我国南方典型缺镁土壤上常用镁肥的淋溶特征,对合理选择镁肥种类及科学施用具有重要的指导意义。为此,本文通过室内土柱模拟实验,探究了 4 种不同类型镁肥在我国南方地区广泛分布的黄壤、酸性紫色土和红壤中的迁移和淋洗特征,以为为镁肥在南方缺镁土壤上的合理施用提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

根据我国主要土壤类型及分布选取了南方三种典型的酸性缺镁土壤(表 1)。其中,黄壤采自重庆市涪陵区,依据国际制土壤质地与我国质地分类,该黄壤质地为粉砂质壤土;紫色土采自重庆市南川区,土壤质地为黏壤土;红壤采自广东省湛江市,土壤质地为壤质黏土。土壤样品风干后,过 1 mm 筛备用。三种土壤的主要化学性质如表 1 所示。

表 1 三种南方典型缺镁土壤的基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the three types of Mg-deficient soils typical of South China

土壤类型 Soil type	质地名称 Texture	土壤颗粒组成 Particle size composition of the soil/(×10 g kg ⁻¹)			
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	物理性黏粒 Physical clay
		1~0.05 mm	0.05~0.01 mm	<0.001 mm	<0.01 mm
黄壤①	粉壤土④	45.1	21.9	14.9	33.0
紫色土②	黏壤土⑤	18.6	19.5	26.7	61.9
红壤③	壤黏土⑥	22.1	14.8	39.6	63.1

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter /(g kg ⁻¹)	交换性镁 Exchangeable Mg/(mg kg ⁻¹)	交换性钙 Exchangeable Ca/(mg kg ⁻¹)	交换性钾 Exchangeable K/(mg kg ⁻¹)	阳离子交换量 CEC /(cmol(+) kg ⁻¹)
黄壤①	5.0	12.4	48.8	976.3	69.3	7.9
紫色土②	4.5	27.5	72.5	1472.5	85.0	22.4
红壤③	4.8	10.6	25.0	281.3	14.7	17.0

①Yellow soil, ②Purple soil, ③Red soil, ④Silt loam, ⑤Clay loam, ⑥Loamy clay

1.2 试验设计及方法

试验选用3种土壤,每种土壤分别设5个处理:处理1,正常施肥但不添加镁肥(CK),氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量分别为150、100和150 mg kg⁻¹,氮肥由尿素提供,磷肥为过磷酸钙,钾肥由硫酸钾提供;处理2,在处理1的基础上添加氧化镁(MgO);处理3,在处理1的基础上添加改性硫酸镁(MgSO₄)(产品执行标准号:Q/HKS 02.01-2017,肥料pH为8~10,含部分氧化镁,德国钾盐公司生产);处理4,在处理1的基础上添加钙镁磷肥(CaMgP);处理5,在处理1的基础上添加硫酸钾镁(KMgS)(硫酸钾镁肥中钾(K₂O)、镁(MgO)含量分别为140 g kg⁻¹和60 g kg⁻¹)。处理2~5中镁肥施用量以氧化镁含量计算,均为100 mg kg⁻¹,施用总量基于整个土柱土壤总量计算,但按施肥习惯仅施在0~15 cm土层。每个处理设3次重复,试验总计45个土柱。

室内模拟土柱^[18]装置采用内径7.5 cm,高55 cm的硬质聚氯乙烯管(PVC),并按如下过程设置:首先,在土柱管底部铺2 cm厚的粒径为0.5~1.0 cm、经2.0 mol L⁻¹盐酸浸泡过夜并用蒸馏水洗净的干燥石英砂,并在底部管口处和砂粒与土壤接触面分别铺上一层200目的尼龙网;然后,分3层标记并装土,即0~15、15~30和30~50 cm各一层,土壤容重1.3 g cm⁻³,每个土柱总共装土2 000 g;最后,土样上端再铺一层约2 cm的石英砂,压实土柱壁边缘的土壤,以保证溶液能够均匀地流入土柱。各处理土柱肥料的加入方法是将所需肥料与0~15 cm土层的土壤混合均匀后,填装在土柱上层。淋洗液用大漏斗承接于250 mL塑料瓶中。

淋溶试验开始前,用去离子水调节土柱水分含量至65%田间持水量,于25℃下恒温预培养7 d。随后,采用间歇淋溶法进行土柱淋溶试验,每次加入去离子水400 mL(以土柱面积及降水量计算,相当于模拟降雨量90 mm),共淋溶11次,持续60 d,总计模拟降雨量约1 000 mm,接近我国南方各省市年均降雨量的下限。

试验期间,每6天收集一次渗漏液,量取其体积,水样用作溶液pH及镁含量测定。根据渗漏液体积和渗漏液镁浓度计算土柱镁元素的淋失量。试验结束后,按标记的0~15、15~30和30~50 cm土层采样,风干后测定土壤交换性镁含量及土壤pH。

1.3 分析测定

土壤pH用酸度计(pHS-3C,方舟科技,成都)(水:土=2.5:1)测定;土壤有机质用重铬酸钾-硫酸外加热氧化法测定;土壤交换性镁用醋酸铵浸提—原子吸收光谱法(TAS-990,普析通用,北京)测定;阳离子交换量用醋酸铵方法测定。淋洗液镁浓度用原子吸收分光光度法测定,pH用酸度计测定^[19]。采用如下公式计算施镁处理中镁肥淋失率和镁肥固定率:

$$\text{镁肥淋失率} = (\text{施镁处理的镁淋失量} - \text{CK处理的镁淋失量}) \div \text{施镁量} \times 100\%$$

$$\text{镁肥固定率} = (\text{施镁量} - \text{土壤交换性镁增量} - \text{镁淋失量}) \div \text{施镁量} \times 100\%$$

1.4 数据处理

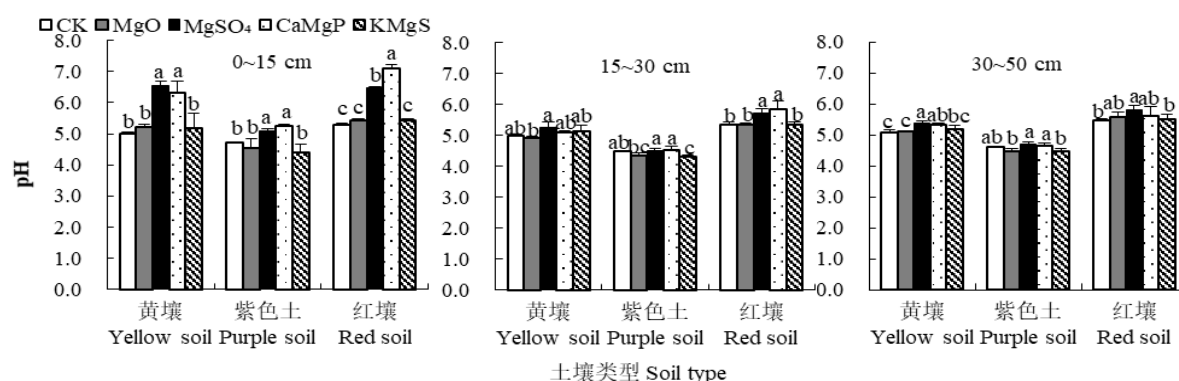
采用Excel 2010、SigmaPlot 12.5软件对数据进行处理和绘图,采用SAS V8统计分析软件对数据进行差异显著性检验(最小显著差异(LSD)法)。

2 结果

2.1 淋洗结束后土壤 pH 及交换性镁含量变化

三种土壤淋溶 2 个月后, 不同镁肥处理对土壤 pH 的影响不同 (图 1)。与 CK 相比, 改性硫酸镁与钙镁磷肥处理显著提高了三种土壤 0~15 cm 土层的 pH, 其余镁肥处理与 CK 无显著差异。本试验中改性硫酸镁和钙镁磷肥均呈碱性, 施入土壤后可提高土壤 pH 进而改善土壤酸化状况, 起到与施用石灰类似的作用^[20]。改性硫酸镁与钙镁磷肥阻控土壤酸化的作用在 15~30、30~50 cm 土层也有体现, 但程度远小于施镁的表层土壤。

氧化镁对三种土壤不同土层的土壤 pH 影响不显著 (图 1), 可能与氧化镁微溶于水, 淋洗周期内未能对土壤 pH 产生显著影响。硫酸钾镁处理有降低紫色土 0~15、15~30 cm 土层 pH 的趋势, 主要原因是硫酸钾镁本身是一种强酸中碱性盐^[21]的肥料, 施入土壤后会使土壤中积累较多的 H⁺, 使土壤向酸性发展^[22]。



注: CK, 施用化肥氮磷钾不施镁肥; MgO, 化肥氮磷钾+氧化镁; MgSO₄, 化肥氮磷钾+硫酸镁; CaMgP, 化肥氮磷钾+钙镁磷肥; KMgS, 化肥氮磷钾+硫酸钾镁。同一土层不同处理上不同字母代表差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同 Note: CK, applying chemical NPK fertilizer only; MgO, CK plus magnesium oxide; MgSO₄, CK plus magnesium sulfate; CaMgP, CK plus calcium magnesia phosphate, KMgS, CK plus potassium sulphate magnesium. Different letters indicates significant difference between treatments of the same soil layer ($P < 0.05$). The same below

图 1 不同镁肥处理对三种土壤不同土层土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of application of magnesium fertilizers on soil pH relative to type of fertilizer, soil layers and type of soil

施用镁肥显著提高了三种土壤的交换性镁含量, 经过 60 d 的淋洗, 不同镁肥在三种土壤剖面中的固持和迁移特征不同 (表 2)。三种土壤施镁土层 (0~15 cm) 交换性镁含量从 20.0~96.3 mg kg⁻¹ 提高至 97.5~511.3 mg kg⁻¹。其中, 改性硫酸镁在三种土壤 0~15 cm 土层中的有效性最高, 并促进了一部分缓效镁的释放, 淋洗实验结束后黄壤、紫色土和红壤 0~15 cm 土层的交换性镁含量分别占总土柱土壤的 53.5%、61.9% 和 47.8%; 其次是钙镁磷肥、氧化镁和硫酸钾镁, 这可能与四种镁肥中改性硫酸镁溶解性最好有关。根据表 2 中各土层土壤交换性镁的变化量可知, 氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁在三种土壤中均表现出较强的迁移能力, 经过 60 d 淋洗, 未施用镁肥土层 (15~50 cm) 中有效镁含量均较对照显著增加, 增加幅度在 17.9~105.4 mg kg⁻¹。钙镁磷肥能增加黄壤和红壤中未施用镁肥土层的有效镁含量, 但降低了紫色土中未施用镁肥土层的有效镁含量。

表 2 不同镁肥处理对三种土壤不同土层中交换性镁分布的影响

Table 2 Effects of application of magnesium fertilizers on distribution of exchangeable magnesium relative to

type of fertilizer, soil layers and type of soil

土层 Soil layer	土壤类型 Soil type	交换性镁含量 Content of exchangeable magnesium/(mg kg ⁻¹)					交换性镁变化量 Variation of exchangeable magnesium/(mg kg ⁻¹)				
		CK	MgO	MgSO ₄	CaMgP	KMgS	CK	MgO	MgSO ₄	CaMgP	KMgS
0~15 cm	黄壤 ^①	20.0c(d)	100.8c(c)	292.5c(a)	200.0b(b)	97.5b(c)	-28.8	52.0	243.7	151.2	48.7
	紫色土 ^②	96.3a(d)	285.0a(b)	511.3a(a)	320.0a(b)	230.0a(c)	23.8	212.5	438.8	247.5	157.5
	红壤 ^③	43.8b(e)	161.3b(c)	350.0b(a)	203.8b(b)	99.2b(d)	18.8	136.3	325.0	178.8	74.2
15~30 cm	黄壤 ^①	35.8c(d)	66.3b(c)	141.3c(a)	120.0a(b)	53.8b(c)	-13.0	17.5	92.5	71.2	5.0
	紫色土 ^②	88.8a(d)	137.5a(b)	166.3b(a)	76.3b(d)	117.5a(c)	16.3	65.0	93.8	3.8	45.0
	红壤 ^③	76.3b(e)	152.5a(b)	256.3a(a)	130.0a(c)	105.0a(d)	51.3	127.5	231.3	105.0	80.0
30~50 cm	黄壤 ^①	27.5c(d)	73.8b(b)	85.0b(a)	56.3a(c)	51.3b(c)	-21.3	25.0	36.2	7.5	2.5
	紫色土 ^②	82.5a(c)	107.5a(b)	111.3a(b)	72.5a(c)	142.5a(a)	10.0	35.0	38.8	0.0	70.0
	红壤 ^③	52.5b(d)	86.3b(b)	95.0ab(b)	71.3a(c)	133.3a(a)	27.5	61.3	70.0	46.3	108.3

注：在同一土层中，同一列数据后不同小写字母（不加括号）表示在 0.05 水平差异显著，同一行数据后不同小写字母（加括号）表示在 0.05 水平差异显著。下同 Note: Different lowercase letters (without parentheses) in the same column mean significant difference at 0.05 level between different treatments in the same soil layer, and different lowercase letters (with parentheses) in the same row mean significant difference at 0.05 level between treatments in the same soil layer. ①Yellow soil, ②Purple soil, ③Red soil. The same as below

2.2 不同镁肥处理对淋洗液体积和镁浓度的影响

不同镁肥处理在同一土壤上同一时间的淋洗量差异不大，而同一镁肥处理在三种土壤上同一时间的淋洗液体积大小依次为：紫色土（黄壤）、红壤。紫色土的淋洗量在第一次淋洗即达到淋洗量峰值；而黄壤和红壤上的淋洗量均在第二次达到淋洗峰值，且均随着时间的推移逐渐降低并趋于平缓。方差分析结果也表明，在整个淋洗实验期间，土柱淋洗液的淋洗量与土壤类型具有极显著的相关关系。

图 2 是不同时间土柱淋洗液中 Mg²⁺浓度变化曲线，可以看出，不同镁肥处理在整个淋洗实验期间均存在 Mg²⁺的淋失。不同镁肥处理淋洗液中 Mg²⁺的浓度因淋洗天数及土壤类型不同而有显著差异，这与前人的研究结果类似^[23]。其中，钙镁磷肥处理与 CK 处理淋洗液 Mg²⁺浓度差异不显著。氧化镁与改性硫酸镁处理在黄壤及紫色土上有较大的淋洗潜力，红壤上硫酸钾镁肥淋洗 Mg²⁺浓度显著高于其他处理。结合表 3 可知在黄壤上，CK 处理淋洗液 Mg²⁺浓度在第 7 天达到峰值；而紫色土上 CK 处理淋洗液 Mg²⁺浓度达到峰值需 19 d，红壤最迟为 39 d。

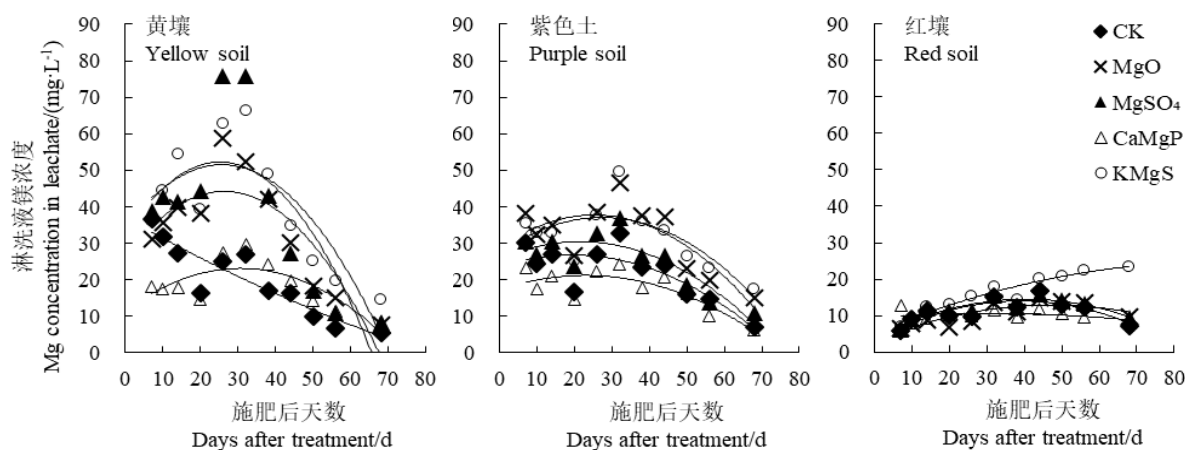


图 2 三种土壤上不同施镁处理淋洗液镁浓度曲线

Fig. 2 Mg²⁺ concentration curves of the leachates from repacked soil columns relative to treatment

施镁处理中,黄壤上各施肥处理达到 Mg^{2+} 淋洗峰值的时间较为接近,这主要与黄壤质地疏松有关(表3、表1)。紫色土与红壤上硫酸钾镁处理的淋洗液 Mg^{2+} 浓度达到峰值时间最迟,分别为27 d和92 d(表3),但是镁淋洗浓度也较高(图2)。这除了土壤质地黏重的因素外,还可能与肥料特性有关。钾镁肥中较高含量的钾逐步促进了土壤镁的释放,在淋洗过程中导致镁淋洗浓度较高,但肥料本身的溶解性不高,使得淋洗周期延长。

表3 不同镁肥处理淋洗液镁浓度与施肥后天数间的回归方程

Table 3 Regression equations expressing relationship between Mg^{2+} concentration of the leachates and days after the treatment

土壤类型 Soil type	处理 Treatments	回归方程 Regression equations	相关系数 Correlation coefficients	淋洗液镁浓度出现峰值天数 Day when peak concentration of magnesium in leachate occurred/d
黄壤 Yellow soil	CK	$y = 0.0015x^2 - 0.581x + 36.96$	0.9125**	7
	MgO	$y = -0.0259x^2 + 1.363x + 26.30$	0.8628**	26
	MgSO ₄	$y = -0.0318x^2 + 1.592x + 32.30$	0.7695*	25
	CaMgP	$y = -0.0125x^2 + 0.764x + 11.44$	0.7820*	31
	KMgS	$y = -0.0261x^2 + 1.338x + 34.34$	0.8201*	26
紫色土 Purple soil	CK	$y = -0.0084x^2 + 0.325x + 23.62$	0.8149*	19
	MgO	$y = -0.0140x^2 + 0.706x + 28.80$	0.8000*	25
	MgSO ₄	$y = -0.0104x^2 + 0.446x + 25.65$	0.8676**	21
	CaMgP	$y = -0.0076x^2 + 0.346x + 17.21$	0.8278**	23
	KMgS	$y = -0.0131x^2 + 0.718x + 27.23$	0.7385*	27
红壤 Red soil	CK	$y = -0.0072x^2 + 0.560x + 3.11$	0.8347**	39
	MgO	$y = -0.0044x^2 + 0.414x + 3.14$	0.8313**	47
	MgSO ₄	$y = -0.0064x^2 + 0.517x + 4.04$	0.8875**	40
	CaMgP	$y = -0.0013x^2 + 0.078x + 9.45$	0.3473	30
	KMgS	$y = -0.0023x^2 + 0.425x + 5.32$	0.9612**	92

注: **代表相关性极显著, *代表系相关性显著 Note: ** means significant correlation at 0.01 level and * means significant correlation at 0.05 level

三种土壤上不同镁肥处理对淋洗液 pH 无显著影响(数据略)。总体而言,淋洗液的 pH 基本上为中性或碱性,这可能是土壤胶体上吸附的盐基离子与淋洗液中的 H^+ 发生交换反应,使 H^+ 被土壤胶体所吸附,淋洗液中 H^+ 减少而盐基离子增加导致淋洗液 pH 较原土壤升高^[24]。

2.3 不同镁肥处理对三种土壤镁累积淋失量的影响

随着淋洗实验的进行,各施肥处理的镁累积淋失量呈现增加的趋势,镁累积淋失速率表现为先快而后趋于平缓(图3)。方程 $y = a(1 - e^{-b \cdot x})$ 能拟合三种土壤中镁累积淋失动态,相关系数均大于 0.990,达到了极显著水平。因此,可利用上述方程得到具有物理学意义的不同镁肥处理下三种土壤上的最大镁累积淋失量。等量施镁条件下,黄壤上不同镁肥处理镁累积淋失量由高到低依次为: $KMgS > MgSO_4 > MgO > CK > CaMgP$,通过计算得到黄壤上各处理镁累积淋失量为 104.9~243.8 $kg\ hm^{-2}$ 。本试验条件下,钙镁磷肥处理的镁淋失量最少,甚至低于 CK 处理,而方程拟合表明,淋洗实验进行到第 94 天时钙镁磷肥处理的镁累积淋失量将高于 CK 处理,但达到最大淋洗量所需的时间需要 1 640 d 左右,有效期在黄壤上最长,也证明钙镁磷肥中的镁不易淋失^[12]。紫色土各处理的镁累积淋失量与黄壤接近,不同镁肥处理镁累积淋失量表现为: $MgO > KMgS > MgSO_4 > CK > CaMgP$,通过计算得到各处理镁

累积淋失量范围在 119.3~205.5 kg hm⁻², 且硫酸钾镁处理在紫色土上有效期最长约为 1 330 d。红壤上各镁肥处理累积淋失量均较少, 其中, 硫酸钾镁肥累积淋失量显著高于其他处理, 利用拟合方程计算得到硫酸钾镁肥的最大累积淋失量可达到 181.5 kg hm⁻², 但达到最大值需要 11 604 d 左右。

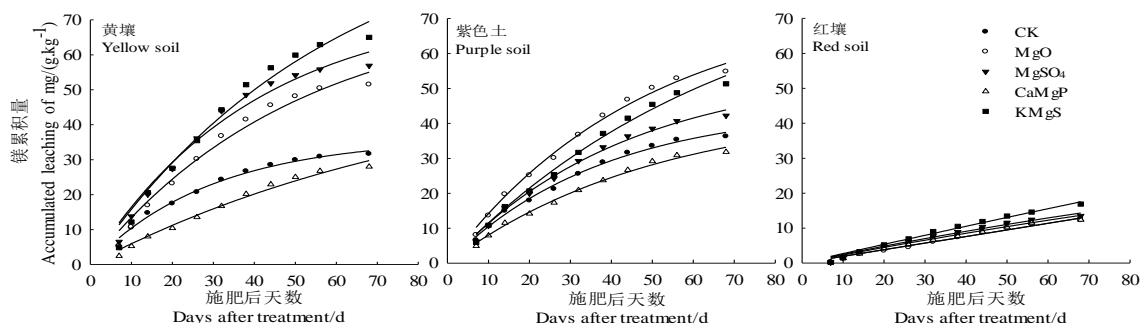


图 3 不同镁肥处理在三种土壤上的镁累积淋失量

Fig. 3 Accumulated leaching of magnesium in three soils relative to type of magnesium fertilizer applied

2.4 不同镁肥处理对三种土壤镁淋失率的影响

如图 4 所示, 三种土壤上淋洗 60 d 后镁肥淋失率在-7.4%~55.6%之间。同时, 结合主体间效应检验的方差分析表得知, 镁淋失率与土壤类型及镁肥种类存在极显著的相关关系。黄壤上施用氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁的淋失率分别达到 33.1%、42.2%和 55.6%, 而施用钙镁磷肥的淋失率为-6.1%, 说明钙镁磷肥增加了土壤对镁的固持。紫色土与黄壤上的结果类似, 但两者均显著高于红壤中的镁淋失率。

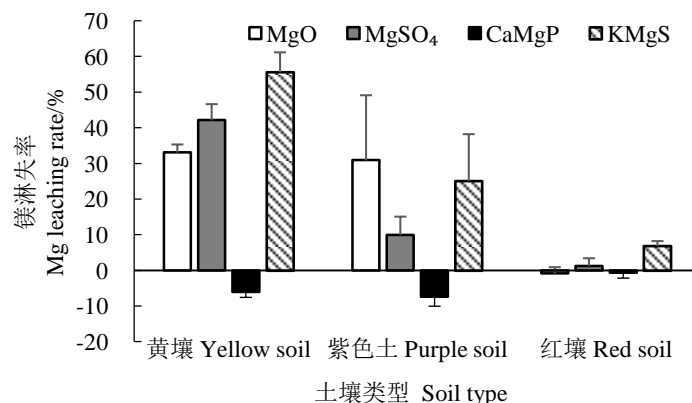


图 4 不同镁肥处理在三种土壤上的镁淋失率

Fig. 4 Mg²⁺ leaching rate in the three types of soils relative to type of magnesium fertilizer applied

根据施镁量、土壤交换性镁含量增量(含水溶态镁)及镁淋失量, 可得到镁肥固定率(表 4)。氧化镁在黄壤和红壤上的镁固定率相似, 为 30%左右, 两者均明显大于紫色土的固定率。通过表 4 可知, 钙镁磷肥在紫色土中的镁固定率最高, 其次是红壤和黄壤。三种土壤中紫色土对硫酸钾镁肥的固定率最低(表 4)。改性硫酸镁在三种土壤上的镁固定率均为负值。

表 4 三种土壤上不同镁肥处理的镁肥固定率

Table 4 Mg fixation rate of in the three types of soils relative to type of Mg fertilizer applied/%				
	MgO	MgSO ₄	CaMgP	KMgS
黄壤 Yellow soil	30.0	-59.4	12.5	31.5
紫色土 Purple soil	0.2	-65.2	45.1	12.2
红壤 Red soil	28.8	-63.5	28.7	39.0

3 讨论

3.1 不同镁肥在三种土壤上的迁移

施用镁肥显著提高了三种土壤各土层的交换性镁含量, 经过 60 d 的淋洗, 不同镁肥在三种土壤剖面中的固持和迁移特征不同。三种土壤类型中, 紫色土 0~15 cm 土层的交换性镁含量提高幅度最大, 这与紫色土黏土矿物中含有对镁结合能力较高的蒙脱石、阳离子交换量大、对镁有较强的吸附能力^[25]有关。根据各土层土壤交换性镁的变化量可知, 氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁在三种土壤中均表现出较强的迁移能力, 这是因为改性硫酸镁溶解性较好, 相比其他三种镁肥更易在土壤中迁移淋失; 而硫酸钾镁肥由于肥料中含有钾元素, K^+ 与 Mg^{2+} 置换, 减少了 Mg^{2+} 被土壤吸附^[26]进而加速了镁的迁移。钙镁磷肥能增加黄壤和红壤中未施用镁肥土层的有效镁含量, 但降低了紫色土中未施用镁肥土层的有效镁含量。可能的原因是钙镁磷肥中镁虽以非水溶态的 $Mg_3(PO_4)_2$ 形式存在, 溶解度较低^[27], 但施用在酸性土壤上有利于肥料中镁素的释放, 而紫色土本身 CEC 较大, 胶体吸附位点多^[28], 致使镁在紫色土中迁移较慢, 因此, 对紫色土中未施用镁肥土层的有效镁含量无显著影响。

3.2 不同镁肥在三种土壤上的淋失

影响土壤中镁淋失的因素很多, 不同质地的土壤之间理化性质存在差异, 对外源镁肥淋失的影响也不同。经过 60 d 间歇淋洗, 发现同一镁肥处理在三种土壤上同一时间的淋洗液体积大小依次为: 紫色土(黄壤)、红壤, 即在质地较轻的紫色土和黄壤上易发生淋失(表 1)。以淋洗天数为横坐标, 淋洗液镁浓度为纵坐标拟合曲线建立方程, 并通过拟合方程进行计算也证明了这一点(图 2)。在黄壤上, CK 处理淋洗液 Mg^{2+} 浓度在第 7 天达到峰值, 说明 Mg^{2+} 在黄壤中很容易淋失; 而紫色土上 CK 处理淋洗液 Mg^{2+} 浓度达到峰值需 19 d, 红壤最迟为 39 d。在三种土壤中钙镁磷肥处理与 CK 处理淋洗液 Mg^{2+} 浓度差异不显著, 可见钙镁磷肥中的镁不易淋失, 这与前人的研究一致^[12]; 而氧化镁与改性硫酸镁处理在黄壤及紫色土上有较大的淋洗潜力, 红壤上硫酸钾镁肥淋洗 Mg^{2+} 浓度显著高于其他处理。试验中的黄壤为粉砂质壤土, 紫色土为黏壤土, 红壤为壤质黏土, 而物理性黏粒的多少决定了土壤的吸附强弱^[29], 黏粒含量较高的土壤具有较高的吸附量, 镁淋失易发生在具有高渗透率的疏松结构的砂质土壤和碱基含量低的酸性土壤中^[30], 这可能是导致 CK 处理在三种土壤上淋洗液 Mg^{2+} 浓度达到峰值时间出现差异的原因。

利用方程 $y=a(1-e^{-b*x})$ 能拟合三种土壤中镁累积淋失动态, 可得到具有物理学意义的不同镁肥处理下三种土壤上的最大镁累积淋失量。等量施镁条件下, 通过计算得到黄壤上各处理镁累积淋失量为 104.9~243.8 $kg\ hm^{-2}$; 紫色土上各处理的镁累积淋失量略低于黄壤; 红壤上各镁肥处理累积淋失量均较少。这是由于紫色土的土壤阳离子交换能力强于红壤和黄壤, 由于在土壤阳离子交换能力较弱时, 淋失更为严重^[31], 因此, 各镁肥处理在黄壤上淋失最多。三种土壤上淋洗 60 d 后镁肥淋失率在 -7.4%~55.6% 之间。紫色土与黄壤上的结果类似, 两者均显著高于红壤中的镁淋失率, 这是由于红壤中黏粒含量明显高于其他两类土壤(表 1), 而黏粒含量较高的土壤具有较高的吸附量^[29]。一方面, 红壤未施用镁肥土层中的交换性镁变化量显著高于其他土壤, 即红壤中镁的有效性较高, 但其淋溶液镁含量较低, 可见红壤中的镁被吸附在土壤表面, 减缓了镁的淋失(表 2), 另一方面, 红壤质地黏重、水分运移慢, 减缓了养分的迁移^[15]。此外, 红壤的阳离子交换量为中等水平, 盐基饱和度较低; 镁肥施用后可能提高了红壤的盐基饱和度, 进而提高了土壤的 pH(图 1), 增加了土壤对镁的吸附。因此, 红壤质地黏重对镁吸附能力强并减缓水分和养分迁移, 可能是镁淋失率低的主要原因, 但同时施入过多的钾素(硫酸钾镁肥)仍可能加剧红壤中镁的淋失(图 3)。

3.3 不同镁肥在三种土壤上的固持

氧化镁在黄壤和红壤上的镁固定率相似,为30%左右,两者均明显大于紫色土上的固定率。氧化镁在紫色土上的有效性较高,这可能是因为三种土壤中紫色土的pH较低,有利于氧化镁中镁素的释放,因而其镁固定率较低。钙镁磷肥呈碱性并含有钙元素,施用 in 酸性土壤后有利于提高土壤阳离子交换量,增加对镁的吸附,因此其在紫色土中的镁固定率最高,其次是红壤和黄壤。三种土壤中紫色土对硫酸钾镁肥的固定率最低,这是由于紫色土中交换性钾含量最高且阳离子交换量最大,加上硫酸钾镁肥料中含有钾元素,土壤中钾镁的拮抗作用使得钾镁肥施入土壤后土壤胶体对镁的吸附减弱,进而导致紫色土中硫酸钾镁肥固定率降低^[32]。

施用改性硫酸镁提高了三种土壤中镁的有效性(表2),这可能与土壤pH升高而导致交换性镁增加有关。当土壤pH下降时, H^+ 的交换作用可导致镁的有效性上升,此时土壤镁形态主要以水溶态存在,但极易被淋失,逐渐导致土壤有效镁降低;当土壤pH升高(pH为6.0~8.0)时,有利于 Mg^{2+} 水解成羟基离子且土壤表面负电荷密度增大,土壤对镁的吸附增加,土壤中镁形态主要以交换态存在,可减少其随水淋失的风险,即可供植物直接吸收利用,因而土壤镁有效性提高^[33]。同时,改性硫酸镁肥在三种土壤上的固定率均为负值,表明部分矿物态或非交换态镁被释放。这可能因为改性硫酸镁呈碱性且溶解度高,施用于酸性土壤后土壤pH达6.0以上(图1),而土壤pH在6.0~8.0时,有利于矿物态或非交换态镁向交换态镁的转化,使土壤中镁的有效性提高^[25];另一方面,土壤有效镁与其他形态镁之间存在着平衡,随着淋洗实验的进行,镁素淋失量逐渐增加,使得土壤中的一部分非交换态镁释放出来。但是,改性硫酸镁促进矿物态或非交换态镁转化为交换性镁(水溶态镁)的具体机制仍需深入研究。

4 结论

在三种南方典型酸性缺镁土壤中施用不同镁肥均可提高施镁土层交换性镁含量,但不同镁肥在三种土壤中的有效性存在显著差异。镁素在三种强酸性土壤中具有较强的迁移能力并极易淋失,尤其是在质地较轻的黄壤和紫色土上。与氧化镁、改性硫酸镁和硫酸钾镁肥相比,钙镁磷肥增强了土壤对镁的固持,能减缓镁素淋失。综合四种镁肥在土壤中的有效性及其迁移淋洗特征,钙镁磷肥在三种酸性缺镁土壤中施用效果均较好。但上述结论基于室内土柱模拟试验,未来需进一步通过盆栽或大田试验验证其生物有效性才能进一步推广至农业生产中。

参考文献

- [1] 唐先干, 苏金平, 何宽信, 等. 不同类型紫色土交换性钙镁含量及对烟叶钙镁分布的影响. 中国烟草科 Tang X G, Su J P, He K X, et al. Exchangeable Ca and Mg contents in various purple soils and their effects on Ca and Mg contents in flue-cured tobacco (In Chinese). Chinese Tobacco Science, 2013, 34(4): 1-4
- [2] Jin X L, Ma C L, Yang L T, et al. Alterations of physiology and gene expression due to long-term magnesium-deficiency differ between leaves and roots of *Citrus reticulata*. Journal of Plant Physiology, 2016, 198: 103-115
- [3] Li C P, Qi Y P, Zhang J, et al. Magnesium deficiency induced alterations of gas exchange, major metabolites and key enzymes differ among roots, and lower and upper leaves of *Citrus sinensis* seedlings. Tree Physiology, 2017, 37(11): 1564-1581
- [4] 自由路, 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. 中国土壤与肥料, 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 (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2004(2): 3-5
- [5] Senbayram M, Gransee A, Wahle V, et al. Role of magnesium fertilisers in agriculture: Plant-soil continuum. *Crop & Pasture Science*, 2015, 66: 1219-1229
- [6] Lundin L, Nilsson T. Initial effects of forest N, Ca, Mg and B large-scale fertilization on surface water chemistry and leaching from a catchment in central Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2014, 331: 218-226
- [7] Ylaranta T, Uusikamppa J, Jaakkola A. Leaching of phosphorus, calcium, magnesium and potassium in barley, grass and *Fallow lysimeters*. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, 1996, 46: 9-17
- [8] Koc J, Rafalowska M, Skwierawski A. Changes in magnesium concentrations and load in runoff water from nitrate vulnerable zones. *Journal of Elementology*, 2008, 13(4):559-570
- [9] 陈星峰. 福建烟区土壤镁素营养与镁肥施用效应的研究. 福州: 福建农林大学, 2005
Chen X F. Studies on magnesium nutrition and the control methods of quality flue-cured tobacco (In Chinese). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2005
- [10] 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. *Plant and Soil*, 2013, 368: 5-21
- [11] Chen Z C, Peng W T, Li J, et al. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 2017
- [12] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 山地龙眼园土壤镁素淋失特点模拟. *山地学报*, 2000, 18(3): 248-252
Li Y, Liu X H, Zhuang W M. The characteristics of leaching loss of magnesium in mountain soil of longan orchard (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2000, 18(3): 248-252
- [13] 汤宏, 张杨珠, 龙怀玉, 等. 洞庭湖平原菜园土壤养分径流规律及其影响因素. *土壤学报*, 2012, 49(1): 111-120
Tang H, Zhang Y Z, Long H Y, et al. Nutrient loss with runoff from vegetable soil derived from river alluvial in Dongting Lake Plain and its affecting factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 111-120
- [14] 陈海均, 邓兰生, 涂攀峰, 等. 滴灌下不同质地土壤中镁的移动与分布. *热带作物学报*, 2010, 31(5): 719-723
Chen H J, Deng L S, Tu P F, et al. Distribution of exchangeable magnesium in different soil texture under drip fertigation (In Chinese). *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(5): 719-723
- [15] Nkem J N, Bruyn L A L, Grant C D, et al. The impact of ant bioturbation and foraging activities on surrounding soil properties. *Pedobiologia*, 2000, 44(5): 609-621
- [16] Adomaitis T, Staugaitis G, Mazvila J, et al. Leaching of base cations as affected by a forty-year use of mineral fertilization. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2013, 100(2): 119-126
- [17] 闫波. 石灰性土壤上日光温室番茄缺镁机理及镁肥效应研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015
Yan B. Mechanism of magnesium deficiency and the effects of magnesium on tomato in greenhouse that built on calcareous soil (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015
- [18] 余砾, 高明, 黄利玲, 等. 施用氮肥对砖红壤硝态氮和盐基离子淋失特征的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 698-704
Yu L, Gao M, Huang L L, et al. Effects of nitrogen fertilization on leaching characteristics of NO_3^- -N and base cations in latosol (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 698-704
- [19] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测. 北京: 中国大地出版社, 2008

- Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agriculture chemical analysis and environmental monitoring (In Chinese). Beijing: China Land Press, 2008
- [20] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响. 土壤学报, 2016, 53(1): 202-212
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, et al. Effect of long-term fertilization and lime application on soil acidity of reddish paddy soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(1): 202-212
- [21] 何春梅, 王飞, 林诚, 等. 不同土壤类型对硫酸钾镁肥中钾、镁、硫吸附特性研究. 土壤通报, 2011, 42(3): 622-626
- He C M, Wang F, Lin C, et al. Study on the soil adsorption characteristics of potassium, magnesium, and sulphur in potash magnesium sulphate fertilizer as affected by different soil types (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 622-626
- [22] 罗春梅. 硫酸钾镁肥对小白菜产量、品质及养分吸收的影响. 武汉: 华中农业大学, 2014
- Luo C M. Effects of applying potassium-magnesium sulfate on yield, quality of *pakchoi* and soil nutrients (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014
- [23] Zarabi M, Jalali M. Leaching of nitrogen and base cations from calcareous soil amended with organic residues. Environmental Technology, 2012, 33(14): 1577-1588
- [24] Dai Z M, Liu X M, Wu J J, et al. Impacts of simulated acid rain on recalcitrance of two different soils. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20: 4216-4224
- [25] 金昆. 土壤对镁的吸附解吸特性研究. 重庆: 西南大学, 2008
- Jin K. Research on adsorption and desorption of magnesium in soil (In Chinese). Chongqing: Southwest University, 2008
- [26] Farhat N, Elkhouni A, Zorrig W, et al. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38: 145
- [27] 易琼, 杨少海, 黄巧义, 等. 改良剂对反酸田土壤性质与水稻产量的影响. 土壤学报, 2014, 51(1): 176-183
- Yi Q, Yang S H, Huang Q Y, et al. Effect of soil ameliorants on soil properties and rice yield of acid sulfate paddy field (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 176-183
- [28] 丛日环, 张丽, 鲁艳红, 等. 长期秸秆还田下土壤铵态氮的吸附解吸特征. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 380-388
- Cong R H, Zhang L, Lu Y H, et al. Adsorption-desorption characteristics of soil ammonium under long-term straw returning condition (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(2): 380-388
- [29] Mengutay M, Ceylan Y, Kutman U B, et al. Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. Plant and Soil, 2013, 368: 57-72
- [30] 王晟强, 郑子成, 李廷轩, 等. 植茶年限对土壤团聚体中交换性盐基离子分布的影响. 土壤学报, 2013, 50(5): 1013-1020
- Wang S Q, Zheng Z C, Li T X, et al. Effects of age of tea plantations on distribution of exchangeable base cations in soil aggregates (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5): 1013-1020
- [31] Verbruggen N, Hermans C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. Plant and Soil, 2013, 368: 87-99
- [32] 陈竹君, 王益权, 周建斌, 等. 钾镁供应浓度及比例对温室土壤K-Mg吸附特性的影响. 水土保持学报, 2008, 22(5): 106-109
- Chen Z J, Wang Y Q, Zhou J B, et al. Effects of concentrations and ratios of K^+ and Mg^{2+} ions on their adsorption to soils under sunlight greenhouse cultivation (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 106-109

- [33] Chubin R G, Steet J J. Adsorption of cadmium on soil constituents in the presence of complexing ligands. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10(2): 225-228

Movement and Leaching of Magnesium Fertilizers in Three Types of Magnesium-deficient Soils in South China Relative to Fertilizer Type

LI Danping¹ LIU Dunyi^{1,2} ZHANG Baige³ YANG Min¹ LI Wenli¹ SHI Xiaojun^{1,2,4} CHEN
Xinping^{1,2} ZHANG Yueqiang^{1,2,4†}

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

(2 Academy of Agricultural Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China)

(3 Vegetable Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

(4 National Monitoring Station of Soil Fertility and Fertilizer Efficiency on Purple Soils, Chongqing 400716, China)

Abstract 【Objective】 Magnesium (Mg) is a mineral nutrient essential to plant growth. It is the central atom of chlorophyll, and also an activator of various enzymes, involved in various metabolic reactions in plants. Magnesium deficiency can affect normal growth and yield quality of the crops involved. Nevertheless it has become more and more a common problem in the soil-crop systems in South China, in the last decades, where though large volumes of chemical fertilizers are applied, little magnesium fertilizers are, and the removal of magnesium by crop and soil Mg leaching is high. Mg leaching in the soil is one of the primary factors leading to Mg deficiency in the soil and crops in the tropical and subtropical regions of China with high temperature and plentiful rainfall. To solve the problem, application of magnesium fertilizer has become an important strategy. Therefore, it is of great importance to explore characteristics of Mg movement and leaching in Mg deficient soils as affected by Mg fertilizer application for rationalizing application of Mg fertilizers. 【Method】 An indoor soil column simulation experiment was conducted to study movement and leaching of Mg in the three types of acid Mg-deficient soils (red soil, yellow soil and purple soil common in South China), applied with magnesium oxide (MgO), improved magnesium sulfate (Improved MgSO₄, pH>8), calcium magnesium phosphate fertilizer (CaMgP) and potassium sulphate magnesium (KMgS), separately, and consequently efficiency of the fertilizers. This study is expected to be able to provide certain technical support for rationalization of the application of Mg fertilizers in the soils typical of South China.

【Result】 Results show that soil exchangeable Mg increased by 2~15 folds in all the three types of soils (0~15 cm) after application of the Mg fertilizers at a rate of MgO 100 mg kg⁻¹. Among the four types of Mg fertilizers, Improved MgSO₄ was the highest in the effect and followed by CaMgP, MgO and KMgS, sequently. After 60-days of leaching with simulated rainfall amounting to 1000 mm, strong downwards movements of soil Mg in the soils applied with MgO, improved MgSO₄ or KMgS fertilizer were observed. Compared with the soils with no Mg applied (CKs), the soils applied with Mg fertilizer had soil exchangeable Mg increased in concentration significantly or by a range of 17.9~105.4 mg kg⁻¹ in the 15~50 cm soil layer as a result of leaching of Mg from the top layer (0~15 cm). The effect was significant in the yellow soil and red soil applied with CaMgP, but not in the purple soil. In general, Mg concentration in leachate displayed a trend, increasing first and then decreasing, which could be well described with a quadratic equation. Accordingly, the amount of leached Mg from the soils under different Mg treatments could be well matched by exponential equations. The accumulated Mg

leaching from the yellow soil varied in the range of 104.9~243.8 kg hm⁻², which was close to that from the purple soil, and 2~3 times higher than that from the red soil. Compared with CKs, application of MgO, improved MgSO₄ or KMgS fertilizer significantly increased the amount of Mg leaching in the yellow soil and purple soil, while application of CaMgP fertilizer did reversely. After the leaching experiment, the leaching rates of the MgO, improved MgSO₄ and KMgS fertilizers applied in the yellow soil and purple soil were all higher than one-third, whereas lower than 7% in the red soil. On the other side, application of CaMgP enhanced retention of Mg in the soils, and slowed down the downwards movement of Mg, thus reducing Mg leaching during the leaching experiment period as compared with CK. 【Conclusion】 By considering integrately the effects of the four types of magnesium fertilizers on availability, retention and leaching of Mg in the soil and retardation of soil acidification, CaMgP fertilizer is preferred for all the three types of acid soils typical of South China, although its biological availability needs to be studied further.

Key words Types of magnesium fertilizer; Acid soil; Movement; Leaching; Retention; Calcium magnesium phosphate fertilizer (CaMgP)

(责任编辑: 陈荣府)