

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.010

熊章裕, 陈慧涓, 何业柳, 等. 外源钾铝对不同镁肥在砖红壤中淋溶的影响. 土壤, 2024, 56(2): 319–325.

外源钾铝对不同镁肥在砖红壤中淋溶的影响^①

熊章裕, 陈慧涓, 何业柳, 姚 婧, 范晓红, 陈璐俊杰, 耿建梅*

(海南大学热带农林学院, 海口 570228)

摘 要: 研究海南浅海沉积物发育砖红壤中高钾与高铝共存对不同镁肥淋洗的影响, 可为该缺镁土壤上合理施用镁肥提供理论依据。采集浅海沉积物发育砖红壤, 设置 4 个钾铝处理: 不加钾铝(-K-Al)、高钾(+K)、高铝(+Al)、高钾高铝共存(+K+Al), 通过室内土柱模拟试验研究了一水硫酸镁、白云石、氢氧化镁、氧化镁、钙镁磷肥的淋失特征。结果表明: 不同处理第 1 次淋溶液中镁浓度最大(125.47 ~ 898.81 mg/L), 第 2 次骤降(8.79 ~ 157.64 mg/L), 第 3 次再骤降(0.51 ~ 29.28 mg/L), 往后第 4 ~ 11 次趋于平稳(0.25 ~ 9.41 mg/L); 施用镁肥处理淋溶液中镁浓度均高于对照处理, 其中一水硫酸镁处理最高(898.81 mg/L), 而白云石处理最低(212.50 mg/L)。+K+Al 条件下淋溶液中镁浓度显著高于其他条件, 镁累积淋失量大致为 +K+Al > +Al > +K > -K-Al; 不同种类镁肥处理的镁累积淋失量为 19.16 ~ 142.96 mg, +K+Al 条件下镁累积淋失量由高到低顺序为: 一水硫酸镁 > 钙镁磷肥 > 氢氧化镁 > 氧化镁 > 白云石, 镁淋失率最低的是白云石处理(8.22%), 最高是一水硫酸镁处理(82.54%)。11 次淋洗结束, 0 ~ 20 cm 土层中, 与对照处理相比, 除一水硫酸镁处理外, 施用镁肥处理均提高了土壤 pH, 土壤交换性镁含量大致为 +K+Al < +Al < +K < -K-Al; 同一钾铝条件下对照处理与一水硫酸镁、白云石处理的土壤交换性镁含量几乎没有显著差异, 而且都显著低于氢氧化镁、氧化镁、钙镁磷肥处理。综上所述, 施用镁肥后, 应注意水分管理防止镁被大量淋洗; +Al 处理对镁淋洗的影响大于 +K 处理, 且 +K+Al 处理对镁淋洗有促进作用。在海南浅海沉积物发育的砖红壤上易淋洗的一水硫酸镁不宜作为基肥施用, 尤其在钾铝共存条件下应少量多次施用, 可选择镁肥淋失率较低的白云石做基肥。

关键词: 钾铝共存; 镁肥淋洗; 浅海沉积物

中图分类号: S15 **文献标志码:** A

Effect of Exogenous Potassium and Aluminum on Magnesium Leaching from Different Magnesium Fertilizers in Latosol

XIONG Zhangyu, CHEN Huijuan, HE Yeliu, YAO Jing, FAN Xiaohong, CHEN-LU Junjie, GENG Jianmei*

(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In this paper, the effects of coexisting high potassium (K) and high aluminum (Al) on magnesium (Mg) leaching of different Mg fertilizers in latosol derived from the shallow sediments in Hainan was studied in order to provide a theoretical basis for the rational application of Mg fertilizers. Latosol derived from shallow sediments was collected and four treatments were designed, including non K and Al(-K-Al), high K (+K), Al toxicity (+Al), and coexistence of high K and high Al (+K+Al), and then the leaching characteristics of five Mg fertilizers, including magnesium sulfate monohydrate(MgSO₄·H₂O), dolomite (CaMg(CO₃)₂), Mg(OH)₂, MgO, calcium magnesium phosphate fertilizer (CaMgP) were studied through simulated soil column experiments. The results showed that Mg concentration in the first leachate was the highest (125.47–898.81 mg/L), steeply decreased in the second and third leachates (8.79–157.64 mg/L and 0.51–29.28 mg/L, respectively), then tended to stable in the following leachates (0.25–9.41 mg/L). Mg concentrations in the leachates treated with Mg fertilizers were higher than that of CK, with MgSO₄·H₂O being the highest (898.81 mg/L) and CaMg(CO₃)₂ the lowest (212.50 mg/L). Mg concentrations in the leachates under +K+Al were significantly higher than those of other treatments, and the accumulated contents of leached Mg under different types of Mg fertilizers ranged from 19.16–142.96 mg, and were almost always in the order of +K+Al > +Al > +K > -K-Al. The accumulated contents of leached Mg under +K+Al treatment were in the order of MgSO₄·H₂O > CaMgP > (Mg(OH)₂ >

①基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(32160755)资助。

* 通讯作者(616295256@qq.com)

作者简介: 熊章裕(1996—), 男, 海南万宁人, 硕士研究生, 主要从事镁肥合理施用方面研究。E-mail: 627577856@qq.com

MgO>CaMg(CO₃)₂, with the lowest being CaMg(CO₃)₂ (8.22%) and the highest being MgSO₄·H₂O (82.54%). After 11 times leaching, compared with CK, in the 0–20 cm soil layer, except for MgSO₄·H₂O, Mg fertilizers increased soil pH, and soil exchangeable Mg contents were almost all in the order of +K+Al < +Al < +K < -K-Al. Under the same treatment, there was almost no significant difference in exchangeable Mg content between CK, MgSO₄·H₂O, and CaMg(CO₃)₂ treatments, but both were significantly lower than Mg(OH)₂, MgO and CaMgP. Therefore, attention should be paid to water management after Mg fertilizer application to prevent excessive Mg leaching. +Al has a greater impact on Mg leaching than +K, and +K+Al can promote Mg leaching, then, MgSO₄·H₂O, prone to leaching, should not be used as a base fertilizer, especially under the coexistence of K and Al, it should be applied in small amount and multiple times. Comparatively, CaMg(CO₃)₂ with a low Mg leaching is recommended as the base fertilizer.

Key words: Coexistence of potassium and aluminum; Magnesium fertilizer leaching; Shallow sediments

镁是作物生长发育必需的矿质营养元素之一,是叶绿素的重要组成成分,对植物的光合作用具有重要影响。同时,镁也是作物体内多种酶的组成成分以及激活剂,参与作物体内多种生化反应和物质代谢等^[1]。作物缺镁将导致作物体内叶绿素合成受阻,光合作用减弱,造成作物产量和品质下降^[2]。

作物体内的镁主要来源于土壤中的有效镁,镁离子半径小,水合半径大,不易被土壤胶体吸附而保持,因此镁缺乏尤其容易出现在降雨多、砂质的酸性土壤上^[3]。海南省主要农田土壤中交换性镁含量最低仅 1.42 mg/kg,处于极缺乏、缺乏与较缺乏状态的土壤共占 86.75%^[4]。土壤交换性镁含量小于 50 mg/kg 时,属于极度缺乏状态^[5]。

在降雨量大的南方,合理施用镁肥必须考虑镁肥在土壤中的迁移和淋洗特征。已有研究表明,镁肥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 1/3,而红壤中均低于 7%^[6]。相同条件下施用氯化镁的镁淋失量分别为钙镁磷肥和硫酸镁的 2.32 倍和 1.50 倍^[7]。硫酸镁、氢氧化镁、氧化镁、白云石灰、钙镁磷肥施入土壤后镁的淋失率分别为 32.88%、27.30%、24.08%、19.26%、11.86%^[7]。在辣椒试验中,镁淋失率大小顺序为:硫酸钾钙镁>硫酸镁>纳米氢氧化镁>改性纳米氢氧化镁>磷酸铵镁;在白菜试验中,镁淋失率大小顺序为:硫酸钾钙镁>磷酸铵镁>改性纳米氢氧化镁>硫酸镁>纳米氢氧化镁^[8]。

研究表明,钾会增加镁的淋洗,2 个施用硫酸钾处理的镁淋失量分别比对照提高 43.13%、66.50%^[9];施用氯化钾后的镁淋失量比对照提高 17.24%^[10]。酸性土壤中的 Al³⁺易将胶体上吸附的 Mg²⁺代换进入溶液,遇降雨或大量灌水增加 Mg²⁺的淋洗,土壤交换性镁含量与土壤活性铝含量呈极显著负相关^[7]。

我国蔬菜生产上施氮、磷和钾肥量普遍超量,主要设施蔬菜与露地蔬菜中钾施用总量分别是其推荐量的 1.6 倍与 1.5 倍^[10]。海南冬季瓜菜以露地蔬菜为主,过量施用氮、磷和钾肥也非常普遍^[11]。海南的地带性土壤砖红壤,经强烈的脱硅富铁铝化作用发育而成,土壤酸性较强,不合理施肥加剧了土壤酸化,因而海南一些瓜菜地土壤出现高钾与高铝共存现象,但其对不同种类镁肥淋洗的影响未见报道。因此,本文采集海南浅海沉积物发育的砖红壤,通过室内土柱模拟淋洗试验,研究了外源添加钾铝对几种代表性镁肥淋洗特征的影响,以为该土壤上镁肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自海南省临高县加来镇农田,由浅海沉积物发育而成。土样分层(0~20 与 20~40 cm)采集,平铺阴干,过 2 mm 筛混合均匀备用。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physiochemical properties of tested latosols

土层 (cm)	容重 (g/cm ³)	<0.01mm 土粒含量(%)	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	交换性钙 (mg/kg)	交换性镁 (mg/kg)	交换性铝 (mg/kg)
0~20	1.30	17.60	5.50	9.3	46.90	142.13	65.33	428.76	22.87	31.50
20~40	1.40	14.00	5.45	3.0	18.04	122.05	55.00	419.62	19.67	15.75

1.2 试验方法

试验设置4个钾铝处理：①-K-Al：加入一定量的氮、磷、钾肥，以模拟正常耕地施肥水平，氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)施用量分别为150、100和150 mg/kg，分别由尿素、过磷酸钙和氯化钾提供；②+K：在处理①的基础上增加钾肥用量，K₂O用量为350 mg/kg；③+Al：在处理①的基础上加铝100 mg/kg(硫酸铝1.235 g)；④+K+Al：在处理②基础上加铝100 mg/kg。各处理土样于25℃下恒温预培养7 d，再分别在上述处理中施用5种镁肥，并以不施镁肥为对照：①不添加镁肥(CK)；②添加一水硫酸镁(MgSO₄·H₂O，含MgO 270 g/kg)，用量0.56 g；③添加白云石(CaMg(CO₃)₂，含MgO 200 g/kg)，用量0.75 g；④添加氢氧化镁(Mg(OH)₂，含MgO 998 g/kg)，用量0.22 g；⑤添加氧化镁(MgO，含MgO 900 g/kg)，用量0.17 g；⑥添加钙镁磷肥(CaMgP，含MgO 80 g/kg)，

用量1.88 g(表2)。施用镁肥处理的镁肥施用量以MgO含量计算，均为150 mg/kg，施用总量基于整个土柱的土壤总质量(1 kg)计算，但按施肥习惯仅施在0~10 cm土层。每个处理设3次重复，总计72个土柱。

室内土柱模拟装置采用内径4.6 cm、高53 cm的硬质聚氯乙烯管(PVC)，并按如下过程设置：先在土柱最底部裹上一层200目尼龙网，并用卡带固定，再在柱子内部最下层平铺2 cm厚的石英砂(经过2.0 mol/L盐酸浸泡过夜，并用去离子水洗净，干燥)；然后根据田间容重(0~20 cm与20~40 cm分别为1.3 g/cm³与1.4 g/cm³)称重装土，先装入20~40 cm土层土壤，并沿四周压实，再装入0~20 cm土层土壤，操作时先将一半左右土倒入，压实至10 cm，剩余部分与肥料混匀后装入，压实至10 cm；最后在土壤上端铺一层约2 cm厚的石英砂。土柱下方淋洗液用大漏斗承接于500 mL塑料瓶中。

表2 供试5种镁肥的基本性质
Table 2 Basic properties of tested five kinds of Mg fertilizers

镁肥名称	代号	pH	MgO(g/kg)	溶解度(g/100 g 水)	生产厂家
一水硫酸镁	MgSO ₄ ·H ₂ O	8.55	270	7.28	莱玉化工
白云石	CaMg(CO ₃) ₂	9.09	200	0.01	丰丰顺石粉产
氢氧化镁	(Mg(OH) ₂)	9.84	998	0.90	化学试剂
氧化镁	MgO	10.06	900	0.58	莱玉化工
钙镁磷肥	CaMgP	9.50	80	2.29	莱玉化工

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200 mL(以土柱面积及降水量计算，相当于模拟降雨量120 mm)。共淋溶11次，持续77 d。

试验期间，每6 d收集一次淋洗液，量取体积，取部分淋洗液测定镁含量。根据淋洗液体积和淋洗液中镁含量计算土柱镁元素的淋失量。试验结束后，按标记的0~20 cm和20~40 cm土层分别采集土样，风干后测定土壤交换性镁含量及土壤pH。

1.3 样品分析测定

土壤pH采用酸度计法($V_{\text{水}} : m_{\text{土}} = 2.5 : 1$)测定；土壤质地采用比重计法测量；土壤有机质采用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法测定；土壤碱解氮采用碱解扩散法测定；土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钒钼酸铵比色法测定；土壤交换性钙镁采用EDTA-铵盐浸提-原子吸收分光光度法测定(原子吸收分光光度计，型号：PinAAcle 900T)；土壤速效钾采用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定；土壤交换性铝采用1 mol/L KCl交换-中和滴定法测定；阳离子交换量采用醋酸铵法测定；淋洗液镁浓度

采用原子吸收分光光度法测定。

采用以下公式计算镁肥淋失率：镁肥淋失率(%)=[(施镁处理的镁淋失量-对照处理的镁淋失量)/施镁量]×100。

1.4 数据处理

采用Excel 2010、Origin 2018软件进行数据处理和绘图，采用Statistics 23统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 钾铝共存对不同镁肥淋洗液中镁浓度的影响

根据表3可知，4个钾铝处理均是在第1次淋洗液中镁浓度最高(125.47~898.81 mg/L)，第2次骤降(8.79~157.64 mg/L)，第3次再骤降(0.51~29.28 mg/L)，往后第4~11次趋于平稳(0.25~9.41 mg/L)，表明施肥后前3次大雨(120 mm)，尤其第1次对镁肥淋失有显著影响。施用镁肥的淋洗液中镁浓度均比CK处理高，其中一水硫酸镁处理最高，而白云石处理最低，原因可能是一水硫酸镁易溶于水，而白云石难溶。在不同钾铝处理下，+K+Al条件下的淋洗液中镁浓度显著高于其他条件。

表 3 淋洗液中 Mg²⁺ 浓度变化(mg/L)
Table 3 Changes in Mg²⁺ concentrations in leachates

钾铝处理	镁肥处理	淋洗次数										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-K-Al	CK	139.05 c	16.05 bc	1.05 b	0.77 b	0.55 b	0.53 b	0.46 b	0.50 c	0.55 c	0.37 c	0.43 c
	一水硫酸镁	640.09 a	75.89 a	8.59 a	4.40 a	4.57 a	4.55 a	4.10 a	3.87 a	3.28 ab	3.50 a	3.41 a
	白云石	138.03 c	15.90 bc	0.98 b	0.77 b	0.59 b	0.65 b	0.59 b	0.57 c	0.63 c	0.48 c	0.46 c
	氢氧化镁	176.55 c	8.79 c	1.07 b	0.65 b	0.49 b	2.40 ab	0.47 b	0.41 c	0.65 c	0.72 c	0.82 c
	氧化镁	149.96 c	11.07 c	1.43 b	0.99 b	1.15 b	1.19 b	1.34 b	1.81 b	2.15 b	2.13 b	2.20 b
	钙镁磷肥	344.13 b	30.47 b	6.12 a	4.39 a	4.16 a	4.38 a	3.78 a	4.01 a	3.82 a	3.92 a	3.76 a
+Al	CK	157.85 c	23.49 b	3.81c	1.75 b	1.19 b	0.85 c	0.38 c	0.66 c	0.60 c	0.45 c	0.38 c
	一水硫酸镁	802.84 a	157.64 a	19.21 abc	4.53 b	3.06 b	2.00 bc	1.28 c	1.58 c	1.20 c	0.96 c	0.83 c
	白云石	125.47 c	52.64 b	12.01 bc	3.44 b	2.17 b	1.81 c	0.90 c	0.82 c	0.78 c	0.68 c	0.54 c
	氢氧化镁	216.74 c	109.94 a	28.66 ab	9.32 a	7.60 a	6.39 a	2.97 b	2.81 b	2.99 b	2.64 b	2.30 b
	氧化镁	220.02 c	111.13 a	31.00 a	9.34 a	8.23 a	7.53 a	4.83 a	4.71 a	4.21 a	4.18 a	3.94 a
	钙镁磷肥	610.23 b	115.39 a	29.28 ab	9.41 a	8.04 a	4.87 ab	3.29 b	4.20 a	3.33 ab	2.93 b	2.69 b
+K	CK	152.82 d	9.96 c	1.41 b	0.70 c	0.57 c	0.33 d	0.34 c	0.39 b	0.42 c	0.34 c	0.31 b
	一水硫酸镁	865.15 a	52.93 a	7.39 a	3.80 b	3.40 a	3.53 bc	2.65 a	2.69 a	2.50 a	2.58 a	2.46 a
	白云石	154.17 d	8.50 c	0.51 b	0.61 c	0.58 c	0.77 cd	0.35 c	0.49 b	0.47 c	0.37 c	0.34 b
	氢氧化镁	185.21 cd	11.50 c	1.64 b	6.37 a	0.84 bc	5.54 ab	0.51 c	1.06 b	1.22 bc	0.83 bc	0.97 b
	氧化镁	246.42 c	17.43 c	1.75 b	0.83 c	0.95 bc	6.48 a	0.53 c	0.94 b	1.06 bc	1.18 abc	0.55 b
	钙镁磷肥	622.81 b	34.17 b	2.28 b	1.13 c	1.39 b	1.75 cd	1.81 b	2.37 a	2.21 ab	2.19 ab	2.68 a
+K+Al	CK	157.57 e	10.84 c	0.55 c	0.56 c	0.58 b	0.35 b	0.17 c	0.29 d	0.48 c	0.23 c	0.25 c
	一水硫酸镁	898.81 a	151.57 a	22.55 a	6.85 a	6.20 a	3.84 a	1.79 b	2.22 b	2.38 b	1.75 b	2.10 b
	白云石	212.50 d	15.27 c	2.87 bc	1.42 c	0.84 b	0.38 b	0.28 c	0.43 cd	0.54 c	0.42 c	0.35 c
	氢氧化镁	689.34 b	87.13 b	16.11 ab	6.32 ab	5.24 a	0.75 b	3.23 a	4.05 a	3.88 a	3.80 a	3.43 a
	氧化镁	460.38 c	93.74 b	19.57 b	7.71 a	6.91 a	0.60 b	3.04 a	3.95 a	3.83 a	3.76 a	3.19 a
	钙镁磷肥	844.22 b	70.77 b	9.34 abc	3.46 bc	2.36 b	1.53 b	0.80 c	1.56 bc	1.45 bc	1.18 bc	1.07 bc

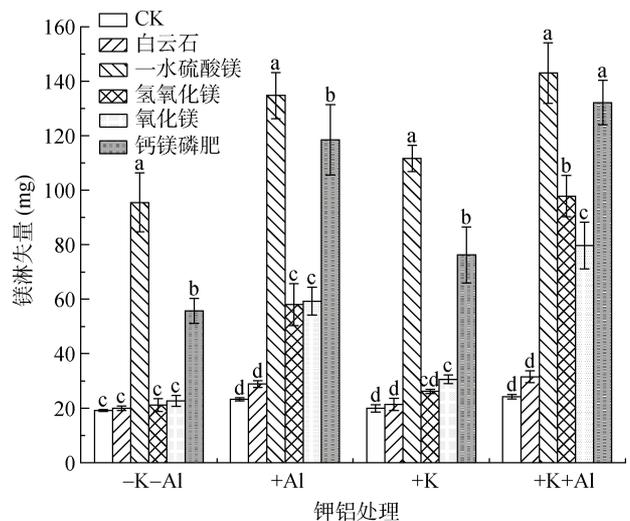
注：同列数据后不同小写字母表示同一钾铝处理条件下不同镁肥处理间差异显著(P<0.05)。

2.2 钾铝共存对不同镁肥镁累积淋失量的影响

由图 1 可以看出,镁累积淋失量为+K+Al > +Al > +K > -K-Al,表明+Al 处理或+K 处理均促进镁淋洗,且+Al 处理的促进作用大于+K 处理,钾铝共存(+K+Al)促进镁淋洗的作用尤为明显;不同种类镁肥处理的镁累积淋失量范围为 19.16 ~ 142.96 mg, +K+Al 下不同镁肥的镁累积淋失量由高到低顺序为:一水硫酸镁>钙镁磷肥>氢氧化镁>氧化镁>白云石,一水硫酸镁处理的镁累积淋失量最高,显著高于其他镁肥,而白云石处理仅略高于 CK 处理,差异不显著。

2.3 钾铝共存对不同镁肥镁淋失率的影响

如图 2 可知,5 种镁肥在淋洗结束后镁肥淋失率为 0.50% ~ 82.54%。结合主体间效应检验的方差分析可知,镁淋失量与钾铝阳离子及镁肥种类存在极显著的相关关系。与其他条件下相比,+K+Al 条件下 5 种镁肥的镁淋失率均最高,为 8.22% ~ 82.54%,其中



(图中不同小写字母表示同一钾铝条件下不同镁肥处理间差异显著(P<0.05);下同)

图 1 钾铝共存下不同镁肥的镁累积淋失量

Fig. 1 Accumulated contents of leached Mg from different Mg fertilizers under coexistence K and Al

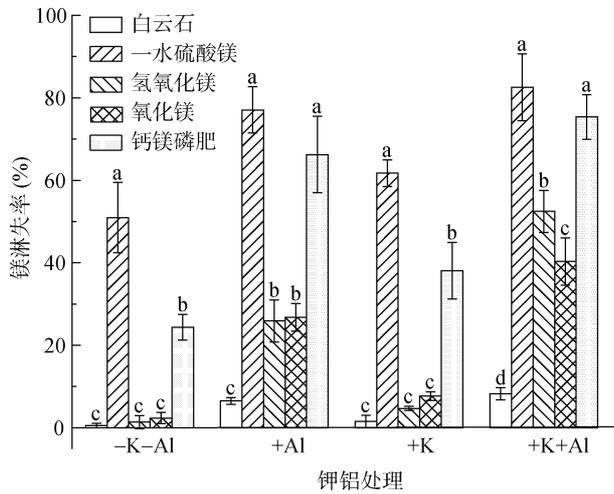


图 2 钾铝共存下不同镁肥的镁淋失率

Fig. 2 Mg leaching rates of different Mg fertilizers under coexistence of K and Al

一水硫酸镁、钙镁磷肥的淋失率分别高达 82.54%、75.34%，而白云石的淋失率为 8.22%。

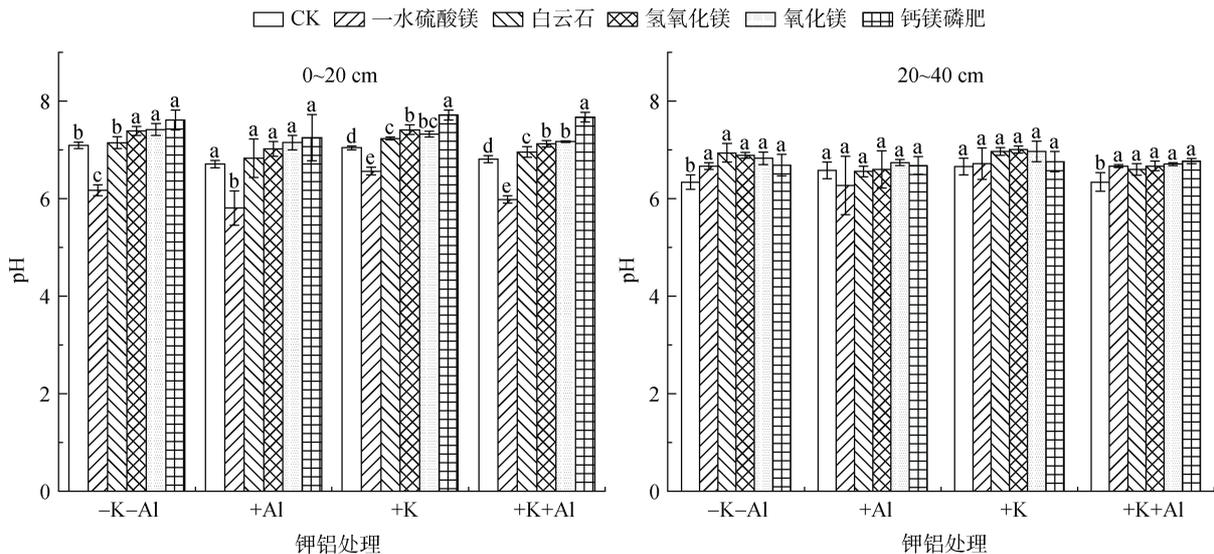


图 3 淋洗结束时土壤 pH

Fig. 3 Soil pH at end of leaching

表 4 淋洗结束时土壤的交换性镁含量(mg/kg)
Table 4 Soil exchangeable Mg contents at end of leaching

土层(cm)	钾铝处理	镁肥处理					
		CK	一水硫酸镁	白云石	氢氧化镁	氧化镁	钙镁磷肥
0~20	-K-Al	15.53 aD	22.57 aD	18.30 aD	85.31 aA	67.82 aB	37.75 aC
	+Al	13.79 aB	11.28 aB	15.48 bB	46.30 bA	45.14 bA	15.50 bB
	+K	13.31 aD	22.54 aD	16.34 aD	86.23 aA	62.93 abB	39.12 aC
	+K+Al	9.37 bB	12.83 aB	14.44 bB	16.54 cB	32.89 bA	15.87 bB
20~40	-K-Al	14.42 aC	62.32 aB	13.94 aC	91.10 aA	83.61 aAB	72.83 aAB
	+Al	4.40 cC	6.63 cC	7.26 bC	46.52 cA	46.74 bA	12.81 cB
	+K	9.57 bC	33.64 bB	7.66 bC	71.14 bA	66.27 abA	37.20 bB
	+K+Al	2.18 cD	6.26 cC	3.09 cCD	33.33 cA	18.15 cB	4.11 dCD

注：在同一土层中，同列数据后不同小写字母表示同一镁肥条件下不同钾铝处理间差异显著($P<0.05$)，同行数据后不同大写字母表示同一钾铝条件下不同镁肥处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 不同镁肥在浅海沉积物发育砖红壤上的淋洗特征

在本次试验淋洗液中镁浓度最高出现在第 1 次淋洗液中(125.47 ~ 898.81 mg/L), 第 2 次淋洗液中镁浓度骤减(8.79 ~ 157.64 mg/L), 第 3 次再骤降(0.51 ~ 29.28 mg/L), 往后第 4 ~ 11 次趋于平稳(0.25 ~ 9.41 mg/L), 其中第 1 次镁淋洗量占总淋洗量的 49.88% ~ 91.00%, 前 3 次镁累积淋洗量占总淋洗量的 91.02 ~ 99.03%, 显著高于他人研究结果^[6-9], 这可能与供试土壤为浅海沉积物发育砖红壤, 黏粒含量小于 20% 以及每次模拟降雨高达 120 mm 有关。露地蔬菜生产中降雨难控制, 施用镁肥后应注意防止大量灌水引起镁淋洗损失。在 5 种镁肥处理中, 一水硫酸镁处理的镁累积淋失量和镁淋失率最高, 可能与一水硫酸镁溶解度高有关(7.28 g/100 g 水), 这与陈星峰^[9]的研究结果一致。一水硫酸镁为强酸性盐, 施入土壤使土壤呈酸性不易被土壤胶体吸附, 加剧镁的淋失^[6], 因此, 淋洗结束时 0 ~ 20 cm 土层土壤的 pH 显著低于不施镁肥的对照土壤。施用一水硫酸镁的 0 ~ 20 cm 土层土壤中交换性镁含量与 CK 处理没有显著差异, 但 20 ~ 40 cm 土层土壤中交换性镁含量显著高于 CK 处理, 表明施入的一水硫酸镁易从上层淋溶至下层, 甚至淋出 40 cm 土层, 因此在浅海沉积物发育砖红壤上一水硫酸镁不宜作为基肥一次施用。

本试验还发现, 钙镁磷肥处理的淋失量和淋失率也很高, 这与前人的研究结果不一致。前人研究表明, 钙镁磷肥可增强酸化土壤对镁的吸附性, 减缓镁的流失^[6]; 在相同施镁条件下, 钙镁磷肥处理的淋失量与淋溶液中镁的浓度较小, 镁肥淋失率为 11.86%, 淋溶液中镁的浓度为 40.78 mg/L^[9]。本研究结果与之不一致, 这可能与试验土壤类型以及每次淋洗水量不同有关, 原因有待进一步研究。

白云石处理的镁淋失量和淋失率最小, 与 CK 处理相似, 这与陈星峰^[9]的试验结果相似, 这是因为白云石是难溶性肥料(0.01 g/100 g 水), 在试验短暂时间内溶解较少。

3.2 钾铝共存对不同镁肥淋洗的影响

本试验表明, 高钾(+K)条件下镁淋失量显著高于不加钾铝(-K-Al)条件, 即高钾处理促进镁淋洗。这与朱悦蕊等^[12]的研究结果相似, 即单施钾肥时, 土壤中交换性镁含量随钾肥用量的增加而降低。由高钾诱导土壤缺镁的现象较为普遍, 土壤中 K^+ 替换土壤

胶体吸附的 Mg^{2+} , 而使 Mg^{2+} 的淋失量增加^[13]。

高铝(+Al)条件下镁淋失量也显著高于不加钾铝(-K-Al)条件, 表明 Al^{3+} 也促进镁淋失。前人研究表明, 当土壤 pH 降低, 土壤胶体所带负电荷减少, 进而会减少土壤对镁的吸附, 土壤交换性镁含量与土壤活性铝含量呈极显著负相关^[7]。土壤 pH 与交换性镁含量也为负相关关系^[14]。可见, 酸化的土壤中镁的形态活跃, 更容易淋失。

无论施镁肥与否, 与单一因素高钾(+K)或高铝(+Al)条件下相比, 钾铝共存(+K+Al)条件下的镁淋失量最大, 表明钾铝共存对镁淋洗具有促进作用。因此, 南方土壤酸性中, 应注意调节土壤酸性, 减少铝毒; 还应注意合理施用肥料, 对需钾量较高的冬季瓜菜也不宜施钾过多, 以免钾铝共存增加镁淋失。

在+K+Al 处理的淋洗液中, 一水硫酸镁的镁肥淋失量最高, 主要是因为一水硫酸镁是速效性肥料, 易溶于水; 白云石的镁肥淋失量略高于 CK, 但差异不显著, 主要是因为白云石难溶于水。因此, 一水硫酸镁由于易淋洗, 应少量多次施用, 而海南冬季瓜菜生产中农户通常把硫酸镁作为基肥一次施入, 瓜菜幼苗期浇水量多且频繁, 这可能是有些菜地施用镁肥后仍然出现缺镁问题的原因。白云石抗淋洗, 可作为基肥施用, 但是其生物有效性如何, 有待进一步研究。本研究结果基于室内土柱模拟试验, 未来需结合盆栽或大田试验, 研究镁肥的生物有效性, 以更好地合理施用镁肥。

4 结论

1) 施镁肥后前 3 次大降雨(120 mm), 尤其第 1 次对镁肥淋失有显著影响, 因此, 施用镁肥后应注意水分管理, 防止镁被大量淋洗。

2) +Al 处理或+K 处理均促进镁淋洗, 且+Al 处理的促进作用大于+K 处理, 钾铝共存(+K+Al)促进镁淋洗的作用尤为明显。在 5 种镁肥处理中, +K+Al 条件下一水硫酸镁处理的镁肥淋失率最高, 其次是钙镁磷肥处理, 白云石处理最低。因此, 在海南浅海沉积物发育的砖红壤上易淋洗的一水硫酸镁不宜作为基肥一次施入, 尤其在钾铝共存条件下应少量多次施用, 可选择镁肥淋失率较低的白云石做基肥。

参考文献:

- [1] Chen Z C, Peng W T, Li J, et al. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants[J]. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 2018, 74: 142-152.

- [2] 臧小平. 土壤铝毒与植物钙镁营养[J]. 广西农业科学, 1997(2): 80–82.
- [3] Maguire M E, Cowan J A. Magnesium chemistry and biochemistry[J]. *Biometals*, 2002, 15(3): 203–210.
- [4] 牛明镇. 海南省主要农田土壤中交换性镁含量与分布及钾镁交互效应研究[D]. 海口: 海南大学, 2020.
- [5] 李伏生. 土壤镁素和镁肥施用的研究[J]. 土壤学进展, 1994, 22(4): 18–25, 47.
- [6] 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.
- [7] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 福建山地龙眼园土壤镁素状况与龙眼缺镁调控措施[J]. 山地学报, 2001, 19(5): 460–464.
- [8] 梁怡. 新型镁肥在西南黄壤蔬菜系统中的施用效果及环境效应评价[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [9] 陈星峰. 福建烟区土壤镁素营养与镁肥施用效应的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2005.
- [10] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1480–1493.
- [11] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3596–3605.
- [12] 朱悦蕊, 胡云飞, 梁扬雪, 等. 钾、镁肥处理下酸化茶园土壤钾镁的交互效应[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(9): 240–246.
- [13] 何盈. 应用土柱模拟测定山地红壤镁素淋失量与有关因素的关系[J]. 福建农业科技, 2004(1): 29–30.
- [14] 邓小华, 李源环, 周米良, 等. 武陵山地植烟土壤酸度特征及影响因素——以湖南省湘西自治州为例[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 304–309.