纳米镁肥降低土壤镁淋洗的机制探究

夏铭阳,梁 怡,刘敦一*

(西南大学资源环境学院,重庆 400715)

摘 要:镁素淋洗是黄壤缺镁的主要原因之一。通过室内土柱模拟淋洗实验探究纳米镁肥减少镁淋洗的机制和原理,以 期为用纳米镁肥缓解黄壤镁淋洗提供依据。结果表明,施用等量镁肥(折合 MgO 2.4 g/kg)后,纳米氢氧化镁处理显著降 低淋洗液镁离子浓度和镁淋洗量,较常规氢氧化镁镁淋洗量降低 25.93%;硫酸镁处理在土壤中表现出较强的迁移能力和 释放能力。分析镁离子吸附和土壤颗粒净作用力发现,纳米镁肥处理增强了土壤颗粒对镁离子和水分的吸附能力,增大 了土壤颗粒1 nm 距离净作用力,从而降低了镁元素的淋洗。综合对镁淋洗特征、水分迁移、吸附能力和微观性质的影 响,施用纳米氢氧化镁是降低土壤镁淋洗的有效措施。

关键词:镁淋洗;纳米镁肥;水分迁移;土壤颗粒静作用力 中图分类号:S143.7⁺2 文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2025)01-0016-09

Investigation on the Mechanism of Reducing Soil Magnesium Leaching by Nano-Magnesium Fertilizer

XIA Mingyang, LIANG Yi, LIU Dunyi*

(School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Magnesium (Mg) leaching is one of the main reasons for magnesium deficiency in yellow soils. Indoor soil column leaching experiments were conducted to explore the mechanisms and principles by which nano–Mg fertilizer reduces Mg leaching, with the aim of providing a basis for using nano–Mg fertilizer to alleviate Mg leaching in yellow soils. The results show that after the application of an equivalent amount of Mg fertilizer (2.4 g/kg MgO), nano–Mg(OH)₂ treatment significantly reduced the concentration of Mg²⁺ and the amount of Mg leaching in the leachate, with a 25.93% reduction in Mg leaching compared to conventional Mg(OH)₂; MgSO₄ treatment exhibited a strong migration and release capacity in the soil. Analysis of Mg²⁺ adsorption and the net forces acting on soil particles revealed that nano–Mg fertilizer treatment enhanced the soil particles' adsorption capacity for Mg²⁺ and moisture, and increased the net force at a distance of 1nm between soil particles, thereby reducing the leaching of Mg. Considering the characteristics of Mg²⁺ leaching, moisture migration, adsorption capacity, and micro–properties, the application of nano–Mg(OH)₂ is an effective measure to reduce soil magnesium leaching.

Key words: Magnesium leaching; Nano-Mg fertilizer; Water migration; Soil particle static force

黄壤是我国主要土壤类型之一¹¹,其特点是母 质化学风化彻底、胶体品质较差、可交换盐基离 子低、对阳离子的吸附能力弱¹²且黄壤中较多的 氢离子、铝离子等与镁离子有拮抗作用。镁是作 物生长发育必需的微量营养元素之一,在促进作

作者简介:夏铭阳(1998-),男,在读硕士,主要从事植物营养与 肥料方面的研究。 物增产增质等方面起到关键作用¹³。而镁离子具 有较大的水合半径,外围包着很厚的水化层,与 负电荷的吸附作用弱,对土壤胶体的吸附强度不 如其他阳离子,从化学特性来看,与钾、钙及铵离 子相比,镁离子半径小且水合半径大,这就导致 在对镁的结合能力相对较弱的黄壤中,镁在土壤 中的移动性更强¹⁴⁻⁶¹。

镁在农业土壤中的去向主要包括作物吸收、 土壤固持、淋洗损失和地表径流¹⁷¹。Ylaranta 等¹⁸¹ 研究不同土地利用方式下不同质地土壤镁素淋失 时发现,镁年均淋失总量达136 kg/hm²,而被植物 吸收带走的镁量平均为40 kg/hm²,不到淋失总量

收稿日期:2024-03-25

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31902117);中 央高校基本科研业务费项目(SWU-KQ22060)

通信作者:刘敦一,男,博士,副教授,E-mail: liudy1989@swu.edu.cn

的1/3。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¹⁰¹,受降雨量、排灌系统和施肥 强度的影响,每年地表径流排放的镁量有4.8~ 41.6 kg/hm^2

为缓解土壤中的镁缺乏问题,目前常见的含 镁肥料主要有水溶性强的速效镁肥(如硫酸镁、 硫酸钾镁等)和微溶于水的缓效镁肥(如氢氧化 镁、氧化镁等)^[10-11]。速效镁肥具有生物有效性 高,施用后见效快的特点,但由于它是水溶性的, 肥效较短,很易被淋出土体,在高温多雨的西南 地区,淋失尤为显著。例如,西南地区辣椒播种 时间在4月份前后,镁肥也随播种一起施用到土 壤中,但辣椒果实生长的快速需镁期主要在7-8 月,而土壤中的速效镁肥早已在多雨的气候中溶 于水淋失了。微溶于水的缓效镁肥虽然相比速效 镁肥淋洗量较少,但其释放速度慢,无法快速提 高土壤有效镁含量,所以可能在作物快速需镁期 无法满足作物对镁的需求^[12]。

纳米肥料因其具有小尺寸效应,比表面积相 对较大,吸附能力强,因而具有不易淋失的特点, 提高了肥料利用效率。梁怡13的试验结果表明, 在相同模拟降雨条件和镁肥用量条件下,相比于 土施速效硫酸镁,施用纳米镁肥的土壤镁淋洗量降 低了22%。同时,因纳米肥料具有纳米材料的特殊 性质,其被作物根系吸收的途径也比常规肥料更高 效141。但纳米镁肥减少镁淋洗的机制尚不清楚,在 微观土壤化学或物理方面的原理尚不明确。

目前国内外关于土壤镁淋洗的有关研究主要 集中关注不同肥料或不同添加剂对镁淋洗的影 响,关于纳米镁肥的研究限于分析宏观尺度的镁 淋洗特征。但关于纳米镁肥减少镁淋洗的微观机 制及原理尚未见报道。西南黄壤区土壤酸化严 重,有效镁含量低且镁淋失现象突出,因此,探究 纳米镁肥减少镁淋洗的微观机制和土壤物理、化 学变化过程对于解决黄壤区农业生产中作物镁 缺乏具有重大意义。本研究过室内土柱模拟淋 洗-水分渗透试验,探究纳米镁肥减少镁淋洗的 机制和微观原理,为纳米镁肥降低土壤镁淋洗 提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自四川省眉山市丹棱县柑橘园, 为酸性低镁土壤。眉山市位于四川盆地中部,成 都平原边缘,四季温和,属于亚热带湿润区季风 气候,年降雨量1200~1500 mm。土壤样品风干 后过1 mm 筛备用。供试土壤的基本理化性质见 表1。本试验采用的硫酸镁、氧化镁、氢氧化镁均 为分析纯,纳米氧化镁和纳米氢氧化镁试剂为麦 克林官网购买。

土壤类型	pH值	有机质/g·kg ⁻¹	交换性钙/mg·kg ⁻¹	交换性镁/mg·kg ⁻¹	交换性钾/mg·kg ⁻¹	阳离子交换量/mol·kg ⁻¹	
黄壤	4.2	12.49	380.63	32.88	104.33	9.0	
2 试验	设计			氨化镁,协理	5 幼米気気化等	崔 ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ՝ ː ː ː ː ː ː ː ː	

表1 十壤基本理化性质

1.2 试验设计

试验共设5个处理:处理1,硫酸镁(七水硫酸 镁);处理2,氧化镁;处理3,氢氧化镁;处理4,纳米

氧化镁;处埋5,纳术氢氧化镁。施镁重按2.4 g/kg 土壤 MgO 计,每个处理3次重复,具体试验处理及 施镁量见表2。

表2 试验处理及施镁量

g/柱

处理	硫酸镁	氧化镁	氢氧化镁	纳米氧化镁	纳米氢氧化镁
处理1	2.6	-	-	-	-
处理2	-	1.25	-	-	-
处理3	-	-	0.86	-	-
处理4	-	-	-	1.25	-
处理5	-	-	-	-	0.86

本试验每土柱施镁量按单个土柱整体土层进 行计算。每个处理3次重复。采用室内土柱模拟 室外外源镁肥在土壤中的淋洗[15-16]。土柱采用定 制硬质聚氯乙烯管(PVC),矩形柱身高约50 cm,宽 2 cm, $\pounds 4 \text{ cm}_{\circ}$

试验布置:按1.1 g/cm3容重分多次装入25 cm 高风干过筛土壤并压实,分次填装土样以保证土 柱内土壤容重上下一致。镁肥试剂称重后分别与

各处理土柱最上层5 cm的土样混合均匀,再装入 土柱;上下各铺有2.5 cm石英砂,防止表层土样 混乱和底层土壤下渗。土柱下方用小烧杯接淋洗 液。正式开始入渗前一天,分别加入等量去离子 水使土壤湿润饱和,并静置稳定一晚。

正式入渗时,从倒入40 mL去离子水开始计时,记录各土柱下方出现第一滴淋洗液的时间、 淋洗液停止流出的时间。土壤持水时间为淋洗液 停止流出的时间减去土柱下方出现第一滴淋洗液 的时间。同时测定淋洗液体积及镁浓度,结束出 现淋洗液后快速将土柱打开,按5 cm一层分层取 土样。烘干后测定土样交换性镁含量、吸附解析 特性及土壤颗粒比表面积。

1.3 测定项目及方法

土壤理化性质指标测定均参考鲍士旦的方法^[17],具体测定方法:土壤pH值采用电极电位法测定(水土比2.5:1);有机质采用重铬酸钾溶液滴定法测定;土壤交换性酸(EA)采用1 mol/L 氯化钾交换后中和滴定法测定;交换性钙镁采用乙酸铵交换法浸提,原子吸收分光光度计测定;交换性盐基离子(EB)用乙酸铵震荡浸提法测定;有效阳离子交换量(CEC)=EA+EB;淋洗液体积用50 mL标准量筒测量;水分渗透时间用秒表记录;土壤交换性镁含量采用乙酸铵交换法,原子吸收分光光度仪测定。

1.3.1 土壤对镁的等温吸附试验

每份土样分别准确称取 2.00 g,6份(含空白 对照组),置于 50 mL塑料离心管中,按1:20 的土 液比,加入 Mg²⁺的浓度分别为 20、40、80、120、160 mg/L的 MgSO₄标准溶液,200 r/min 振荡 2 h后,放 入恒温箱(25 ℃)中培养 22 h,取出离心管,4 000 r/min 离心 5 min,过滤(0.45 mm)后吸取 10 mL溶 液用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测 定待测液镁浓度^[17-18]。吸附量、吸附分配系数的 计算公式为:

 $Q_e = V \times (C_i - C_e) / m \cdots (1)$

式中,Q。为吸附量(mg/kg),V为初始溶液体积 (mL),m为烘干土重(g),C_i为初始液浓度(mg/L), C。为平衡液浓度(mg/L)。

 $K_d = Q_e/C_e$ (2)

式中,K_a为吸附分配系数(L/kg),Q_e和C_e同上。 1.3.2 土壤对镁的解吸试验

去除已经完成吸附试验的离心管中的上清液,然后往离心管土样中加入0.02 mol/L NaNO₃溶液 20 mL, 200 r/min 振荡 2 h 后,放入恒温箱

(25 ℃)中培养22 h,取出离心管,4000 r/min离心 5 min,过滤(0.45 mm)后吸取10 mL溶液用电感耦 合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定待测液镁 浓度,得到土壤镁的解吸量。

$$Q_d = C_d \times V_d / m$$
 (3)

$$R_{Mg}(\%) = \frac{Q_d}{Q_e} \times 100 \cdots (4)$$

式中, Q_d 为解吸量(mg/kg), R_{Mg} 为镁离子在土 壤中的解吸率(%), C_d 为解吸液浓度(mg/L), V_d 为 加入解吸液的体积(mL)^[19]。

1.3.3 土壤颗粒比表面积测定

土壤颗粒比表面积采用 BET 比表面法测定 (物理吸附仪 ASAP 2460 3.01,美国麦克公司)。 BET吸附等温方程(多点法)为:

式中:V为吸附气体体积,V_m为单层吸附气体 容量;c为常数,与吸附剂、吸附质之间相互作用 力有关;p/p₀为相对压力;通过选择不同的压力 点,可以算出其中V_m和c。若V_m以标准状态下的 体积度量,则比表面积S计算公式为:

 $S = \frac{V_m N_A \sigma}{22\,400W} \quad \dots \tag{6}$

式中: N_A 为Avogadro常数, σ 为每个吸附质分子的截面积,W为吸附剂质量(g),22400为标准状态下1mol气体的体积(mL)。

1.3.4 土壤颗粒间净作用力计算

通过在计算程序设定颗粒间距和输入比表面 积可以算出静电斥力和净作用力,长程范德华力 和水合斥力^[20]。范德华引力的计算公式为:

 $P_{\rm rdw}(\lambda) = A_{\rm eff} / (0.6\pi\lambda^3) \quad \dots \quad (7)$

 $P_{vdw}(\lambda)$ 为土壤颗粒间的长程范德华吸引力 (atm), A_{eff} 为土壤颗粒间的Hamaker常数(J), λ为土 壤颗粒间的距离(dm)。水合斥力的计算公式为:

式中, λ 为土壤颗粒间的距离。由于长程范 德华力和水合斥力都只与颗粒间距有关, 所以在 研究相同距离时不同镁肥处理下的土壤颗粒间作 用力时, 长程范德华力和水合斥力都相同。

 $P_{s}(\lambda) = P_{EDL}(\lambda) - P_{vdw}(\lambda) + P_{H}(\lambda) \quad \dots \quad (9)$

该式表示为:净相互作用力 $P_{s}(\lambda)$ 等于土壤 颗粒间静电斥力 $P_{EDL}(\lambda)减范德华力 P_{vdw}(\lambda)$,再加 水合斥力 $P_{H}(\lambda)$ 。

1.4 数据处理及分析

试验数据采用 WPS Excel 2021 软件进行计算

处理及制表;采用 SPSS Statistics 26 软件进行统计分析,选择邓肯多重比较检验确定平均值差异的统计学意义(P<0.05);并用 Sigmaplot 14.0 软件进行吸附曲线的绘制和其他数据绘图。

2 结果与分析

2.1 不同镁肥处理的淋洗差异

由图1可知,各处理淋洗液体积(图1A)差 异不显著(P>0.05)。淋洗液镁浓度(图1B)由高 到低依次为硫酸镁>纳米氧化镁>氧化镁>氢氧 化镁>纳米氢氧化镁,其中硫酸镁处理镁浓度分别比其他处理镁浓度高412.84%、434.76%、287.01%、585.04%;纳米氢氧化镁处理镁浓度比常规氢氧化镁处理镁浓度低21.94%。各处理的镁总淋洗量(图1C)由高到低依次为:硫酸镁>纳米氧化镁>氧化镁>氢氧化镁>纳米氢氧化镁,其中硫酸镁处理镁淋洗量分别比其他处理镁淋洗量高403.57%、422.22%、281.08%、605.00%;纳米氢氧化镁处理淋洗量比常规氢氧化镁处理淋洗量低25.93%。





2.2 不同镁肥处理下土壤交换性镁含量

由图2可知,不同镁肥处理对土壤各土层交 换性镁含量的影响不同。在0~5 cm 土层,土壤交 换性镁含量从高到低依次为:氧化镁>纳米氧化 镁>氢氧化镁>纳米氢氧化镁>硫酸镁,其中硫酸 镁处理分别比其他处理的土壤交换性镁含量低 33.56%、32.97%、33.11%、31.79%。在5~10 cm 土 层,土壤交换性镁含量从高到低依次为:硫酸镁>



图2 不同镁肥处理各土层交换性镁含量

氢氧化镁>纳米氢氧化镁>纳米氧化镁>氧化镁, 其中硫酸镁处理分别比其他处理的土壤交换性镁 含量高 53.37%、19.50%、39.25%、34.91%。10~15 cm、15~20 cm、20~25 cm 土层中,硫酸镁处理土壤 交换性镁含量显著高于其他处理(P<0.05)。

2.3 水分渗透时间

由表3可知,各处理土柱顶端加入去离子水

到土柱底端出现淋洗液的时间由长到短依次为: 纳米氧化镁>纳米氢氧化镁>氢氧化镁>氧化镁> 硫酸镁。其中硫酸镁处理分别比其他处理的时间 短3.46%、18.89%、26.98%、20.97%;纳米氢氧化镁 处理比普通氢氧化镁处理的时间长 2.63%,纳米 氧化镁处理比普通氧化镁处理的时间长 32.22%。 各处理淋洗液收集完成时间由长到短依次

表3 不同镁肥处理土柱水分渗透时间

	${ m MgSO}_4$	MgO	$Mg(OH)_2$	Nano-MgO	Nano-Mg(OH) $_2$
开始渗透到底端出现淋洗液时间	8.93 b	9.25 b	11.01 ab	12.23 a	11.30 ab
淋洗液收集完成时间	163.66 b	176.83 ab	186.16 ab	199.33 a	198.88 a
土壤持水时间	154.73 b	167.58 ab	175.15 ab	187.10 a	187.53 a

注:小写字母不同表示差异显著(P<0.05)。

为:纳米氧化镁>纳米氢氧化镁>氢氧化镁>氧化 镁>硫酸镁。硫酸镁处理分别比其他4个处理的 时间短7.45%、12.09%、17.89%、17.71%。纳米氢 氧化镁处理比普通氢氧化镁处理的时间长 6.83%,纳米氧化镁处理比普通氧化镁处理的时 间长12.72%。

各处理土壤持水时间由长到短依次为:纳米氢 氧化镁>纳米氧化镁>氢氧化镁>氧化镁>硫酸镁。

2.4 不同镁肥处理下土壤镁吸附解吸特性

吸附分配系数(K_a)是衡量元素与土壤之间的 亲和力指标,K_a值越高,说明固相通过吸附保留 的金属越多,土壤固定镁的能力越强。

从不同处理下土壤吸附系数(表4)可以看出,各处理的各浓度平均吸附系数从高到低依次为:纳米氢氧化镁>硫酸镁>氧化镁>纳米氧化镁> 氢氧化镁。其中,在外源镁浓度为20、40 mg/L时, 氢氧化镁、氧化镁和纳米氧化镁处理的吸附系数 都低于其他2个处理,在外源镁浓度为120、160 mg/L时,吸附系数和另外2个处理达到相似水平; 在160 mg/L浓度时,硫酸镁处理的吸附系数低于 其他4个处理。

处理 -		K _d				
	20	40	80	120	160	平均值
$MgSO_4$	4.31	-0.83	-0.92	1.30	3.76	1.52
MgO	-0.42	-1.36	-0.77	1.61	4.34	0.68
$Mg(OH)_2$	-1.86	-2.42	-1.04	1.57	4.25	0.10
Nano-MgO	-1.59	-2.14	-1.06	1.47	4.18	0.17
Nano $-Mg(OH)_2$	4.10	0.10	-0.02	2.28	4.73	2.22

表4 不同处理下土壤的镁吸附分配系数

min

通过BET吸附等温方程(多点法)作出的各处 理吸附曲线(图3)可以看出,不同处理吸附量总 体趋势一致,吸附量从高到低依次为:纳米氢氧 化镁>纳米氧化镁>氢氧化镁>氧化镁>硫酸镁。

 $-\blacksquare$ MgSO₄ $-\clubsuit$ MgO -ℜ Mg(OH)₂ $-\blacksquare$ Nano-MgO -ℜ Nano-Mg(OH)₂



图3 不同处理的BET吸附等温曲线

土壤镁的解吸率(R_{Mg})是土壤中镁的解吸量 与吸附量的百分比,可以反映土壤中镁的释放能 力。从表5土壤镁解吸率结果来看,硫酸镁和纳 米氢氧化镁处理的平均解吸率高于其他3个处理,从高到低依次为:纳米氢氧化镁>硫酸镁>氢 氧化镁>纳米氧化镁>氧化镁。

表5 不同处理下土壤的镁解吸率

	20	40	80	120	160	
$MgSO_4$	64.01	173.72	302.32	9.59	53.30	120.59
MgO	-6.95	-0.23	-13.64	-137.64	40.50	-23.59
$Mg(OH)_2$	-10.44	68.93	-2.77	69.29	40.87	33.17
Nano-MgO	9.50	19.72	-0.85	-186.03	53.99	-20.73
Nano-Mg(OH) $_2$	164.35	-13.88	-32.43	445.32	41.70	121.01

2.5 不同镁肥处理下土壤颗粒比表面积和1 nm 距离净作用力

由图4可以看出,在表层0~5 cm的土壤中,硫 酸镁处理后的土壤颗粒比表面积显著高于其他4 个处理。在5~10 cm和10~15 cm土层中,各处理 土壤颗粒比表面积之间无显著差异;而在15~20 cm和20~25 cm的土层中,硫酸镁处理后的土壤颗 粒比表面积显著低于氧化镁处理、氢氧化镁处理 和纳米氧化镁处理,纳米氢氧化镁处理后的土壤 颗粒比表面积在15~20 cm土层中和硫酸镁处于 相同水平,但在20~25 cm的土层中显著低于其他 4个处理。

由图5可知,在0~5 cm的土层中,硫酸镁处理 后的土壤颗粒间1 nm距离净作用力显著低于其 他4个处理;在5~10 cm、10~15 cm和15~20 cm的 土层中,随着土壤颗粒比表面积的变化以及土壤 中交换性镁含量的变化,硫酸镁处理和纳米氢氧 化镁处理的土壤颗粒间1 nm距离净作用力高于 其他3个处理的程度逐渐变大;在20~25 cm土层 中,纳米氢氧化镁处理显著高于硫酸镁处理,而 硫酸镁处理显著高于氧化镁处理、氢氧化镁处理 及纳米氧化镁处理。

3 讨 论

3.1 施用纳米镁肥对镁淋洗和土壤交换性镁含量的影响

研究发现,速效镁肥处理后的淋洗特征符合 类似的可溶于水的营养元素肥料的淋洗特征,如 氮、磷等。相比于施用常规速效镁肥(硫酸镁)和 常规缓效镁肥(氧化镁、氢氧化镁),施用纳米氧 化镁和纳米氢氧化镁可以显著降低淋洗液中镁离 子浓度和镁总淋洗量。通过观察不同镁肥处理后 的土壤各土层交换性镁含量,可以证明硫酸镁作 为速效镁肥,有释放快、迁移快、淋洗多的特点; 而缓效镁肥和两种纳米镁肥处理后,在0~5 cm 和 5~10 cm 土层中交换性镁含量都明显高于同处理 的下层土壤,说明这些镁肥处理后,交换性镁更 多停留在0~10 cm 的土层中。硫酸镁处理下的土



不同镁肥处理下各土层土壤颗粒比表面积 图 4



图 5 不同镁肥处理下各土层土壤颗粒在1 nm 距离处净作用力

壤交换性镁含量虽在10~25 cm 土层中显著高于 其他四个处理,但大多数作物根系分布和养分吸 收都在 0~10 cm 的浅土层, 硫酸镁处理后的镁分 布与作物根系匹配相性低,可能导致无法为作物 根系的生长和吸收作用提供养分。研究表明,剥 离表层土即腐殖质层,会导致土壤质量降低,甚 至作物产量下降,土壤生物学性质下降的幅度与 土壤层被剥离的厚度呈正相关关系^[21-22];所以如 果无法匹配养分分布和作物生长需要,会导致作 物产量以及质量的下降。

3.2 纳米镁肥对土壤水分渗透速度及镁离子吸 附的影响

通过试验观察模拟淋洗的时间长短可以说明 施用硫酸镁的土壤保水性差,透水性强,水分在 土壤中的迁移速度很快,硫酸镁也溶于水中,释 放出镁离子的迅速向下迁移,造成镁淋失;氧化 镁和氢氧化镁两种缓效镁肥处理后的土壤保水 性、持水时间优于硫酸镁,次于两种纳米镁肥处 理。而纳米氧化镁和纳米氢氧化镁处理出现淋洗 液时间最晚,而且持水时间最长,说明这两种纳 米镁肥处理后的土壤保水性能更好,水分在其处 理后的土壤中迁移速度慢于硫酸镁处理,初步分 析其原因可能是纳米镁肥的施入,增强了土壤 颗粒对镁离子和水分的吸附能力,减缓了水分 因重力等原因的下渗[23]。而且因为纳米镁肥的 施入,使得土壤胶体可与水分进行接触和养分 交换的时间更长,利于肥料养分更多地保留在 土壤中。

土壤颗粒吸附解析特性的测定和BET气体吸 附法测定比表面积的结果也证明了纳米氢氧化镁 处理后的土壤吸附系数高于常规镁肥,土壤颗粒 对镁离子的吸附能力更强。在BET气体吸附时, 两种纳米镁肥处理后的土壤颗粒在同等相对压力 下,吸附量高于常规速效镁肥和缓效镁肥处理后 的土壤颗粒。

3.3 纳米镁肥对土壤颗粒微观性质的影响

在0~5 cm 土层中,硫酸镁处理的土壤颗粒比 表面积显著高于其他处理,说明该层土壤中土壤 颗粒更细,可参与固液界面反应的面积更大,可 能是硫酸镁释放速度快的原因。但综合分析发 现,0~5 cm 土层中硫酸镁处理后的土壤交换性镁 含量却显著低于其他处理,与较大的土壤颗粒反 应面积匹配相性低。而0~10 cm 土层中,纳米镁 肥处理后的土壤颗粒比表面积均处于较高水平, 匹配上同处理该层土壤中的交换性镁含量,可以 便于土壤胶体的养分交换和作物根系的营养元素 吸收^[24]。纳米氢氧化镁处理后土壤颗粒净作用力 都显著提高,分析推测,纳米镁肥可能通过影响 土壤颗粒表面电荷、电场强度等电解质颗粒表面 性质^[25],从而影响微观颗粒之间的作用力。

4 结 论

本研究初步揭示了难溶性肥料淋洗量低的机 制,并进一步探究了纳米镁肥减少镁淋洗的原 理。纳米镁肥与硫酸镁、氧化镁和氢氧化镁相比 淋洗量少的原因是其影响了土壤颗粒间的微观作 用力,增强了土壤颗粒对镁离子及土壤中水分的 吸附能力,进而让土壤持水能力提高和持水时间 延长,减缓镁离子随水分向下迁移的速度。综合 分析对土壤交换性镁含量、水分迁移速度、土壤 颗粒吸附能力和土壤颗粒净作用力的影响,纳米 氢氧化镁的减少淋洗效果、肥料有效性最好。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] 徐畅,高明.土壤中镁的化学行为及生物有效性研究进展[J].微量元素与健康研究,2007,24(5):51-54.
- [2] 李映强.土壤中镁的生物有效性及其动力学性质[J].热带 亚热带土壤科学,1998,3:236-238.
- [3] 吴朝玉,孙桂华.镁肥对甜菜产量及含糖率的影响研究初报[J].吉林农业科学,1990,15(2):81-82.
- [4] Seggewiss B, Jungk A. Influence of potassium dynamics at the soil-root interface on magnesium uptake of plants [J]. Zeitschrift Fuer Pflanzenernaehrung Und Bodenkunde, 1988, 151(2): 91– 96.
- [5] Cakmak I, Kirkby E A. Role of magnesium in carbon artitioning and alleviating photooxidative damage [J]. Physiologia Plantarum, 2008, 133(4):692-704.
- [6] Maguire M E, Cowan J A. Magnesium chemistry and biochemistry [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 15:203–210.
- [7] 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 [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 331: 218-226.
- [8] Ylaranta T, Uusikamppa J, Jaakkola A. Leaching of phosphorus, calcium, magnesium and potassium in barley, grass and allow lysimeters [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-soil and Plant Science, 1996, 46:9–17.
- [9] Koc J, Rafałowska M, Skwierawski A. Changes in magnesium concentrations and load in runoff water from nitrate vulnerable zones [J]. Journal of Elementology, 2008, 13(04):559–570.
- [10] Baltarusaitis J, Sviklas A M. From insoluble minerals to liquid fertilizer: Magnesite as a source of magnesium (Mg) nutrient [J].

ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 2016, 4: 5404–5408.

- [11] Mikkelsen R. Soil and fertilizer magnesium[J]. Better Crops with Plant Food, 2010, 94: 26–28.
- [12] 李鹃,谢光球,章明清,等.不同镁肥种类在烤烟上的施用 效应的研究[J].江西农业大学学报,2005,27(3):394-397.
- [13] 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.
- [14] 杨新萍,赵方杰.植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 [J].环境科学,2013,34(11):4495-4502.
- [15] 李丹萍.不同镁肥在土壤中的迁移淋洗及其生物有效性研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [16] 武秋甫.不同新型肥料降低农业氮磷面源污染的作用与评价[D].重庆:西南大学,2021.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析(3版)[M].北京:中国农业出版社, 2000:152-173.
- [18] 王龙,王子芳,金昆,等.pH和有机质对三种不同土壤镁吸 附特性的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2009,31 (7):150-155.

- [19] Li T, Jiang H, Yang X, et al. Competitive sorption and desorption of cadmium and lead in paddy soils of eastern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(6):1599–1607.
- [20] Silva-Yumi J, Escudey M, Gacitua M, et al. Kinetics, adsorption and desorption of Cd(II)and Cu(II)on naturalallophane: Effect of iron oxide coating [J]. Geoderma, 2018, 319: 70–79.
- [21] 丁文斌.紫色土坡耕地耕层土壤质量诊断及调控途径研究 [D].重庆:西南大学,2018.
- [22] 石元亮,杨国荣,王晶,等.有机物料对苏打盐渍土物理 特性及盐分迁移的影响[J].吉林农业科学,1989,14(2): 47-53.
- [23] 肖强,孙焱鑫,王甲辰,等.纳米材料在土壤与植物营养领域的应用进展[J].中国土壤与肥料,2009(4):10-15.
- [24] 章文,王慧,李敏,等.添加紫云英对稻田土壤颗粒吸附 磷酸盐的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(8): 1388-1397.
- [25] Gouy. On the constitution of the electric charge at the surface of an electrolyte [J]. Comptes Rendus, 1909, 149: 654-657.
 (责任编辑:范杰英)