

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.009

焦加斌, 李金隆, 李静, 等. 华南冬瓜主产区土壤镁素淋洗损失规律. 土壤, 2024, 56(2): 309–318.

华南冬瓜主产区土壤镁素淋洗损失规律^①

焦加斌¹, 李金隆^{1,2}, 李静¹, 常静静¹, 陈潇¹, 宋钊¹, 栗振^{1,2}, 张白鸽^{1*}

(1 广东省农业科学院蔬菜研究所/广东省蔬菜新技术研究重点实验室, 广州 510640; 2 福建农林大学资源与环境学院/国际镁营养研究所, 福州 350002)

摘要:本研究在华南典型冬瓜种植区开展了为期两年的田间试验, 试验共设置 6 个处理, 分别是农户常规施肥(CK)、化肥减量(Mg0)及在化肥减量基础上增施 30、60、90、120 kg/hm² MgO(Mg1、Mg2、Mg3、Mg4), 通过测定不同处理冬瓜种植期内土壤 Mg、N、P、K 和 Ca 淋洗差异, 评估土壤 Mg 营养平衡, 分析不同土壤及环境因子对 Mg 淋洗损失的影响, 旨在探明土壤 Mg 淋洗损失特点, 明确加剧土壤 Mg 淋洗损失的关键因子。结果表明, 与 CK 处理相比, 化肥减量措施下, 土壤 Mg、N、P、K 和 Ca 累积淋洗量分别减少 36.19%~40.50%、29.68%~36.86%、21.14%~46.74%、39.65%~42.83% 和 29.65%~48.60%。外源添加镁肥会增加土壤 Mg 累积淋洗量, 同时也提高了土壤交换性镁含量, 与 Mg0 处理相比, Mg1、Mg2、Mg3 和 Mg4 处理 Mg 累积淋洗量分别显著增加了 42.46%~78.79%、53.94%~69.92%、78.92%~101.83%、133.07%~134.37%; Mg3 和 Mg4 处理下土壤交换性镁含量分别增加了 69.02%~81.10% 和 68.70%~78.54%, 土壤阳离子交换量分别提高了 9.44%~34.93% 和 14.26%~38.31%。采用随机森林模型进行 Mg 淋洗影响因素相对重要性分析发现, 土壤交换性镁含量、降雨量、阳离子交换量、交换性钙和速效钾含量均会显著影响土壤 Mg 的淋洗。因此, 在华南冬瓜种植区开展 Mg 营养管理时, 应注重施用缓效镁肥, 同时注重其他养分平衡, 以提高补 Mg 效率。

关键词: 镁; 养分管理; 淋洗损失; 镁素平衡; 冬瓜

中图分类号: S158 文献标志码: A

Study on Soil Magnesium Leaching Loss in Main Producing Areas of Wax Gourd in South China

JIAO Jiabin¹, LI Jinlong^{1,2}, LI Jing¹, CHANG Jingjing¹, CHEN Xiao¹, SONG Zhao¹, LI Zhen^{1,2}, ZHANG Baige^{1*}

(1 *Guangdong Key Laboratory of Vegetable New Technology Research, Vegetable Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China*; 2 *International Magnesium Nutrition Institute, College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: In this study, a two-year field experiment was conducted in a typical wax gourd growing area in South China, in which six treatments were set up: conventional fertilizer (CK), fertilizer reduction (Mg0), and additional application of 30, 60, 90, 120 kg/hm² MgO (Mg1, Mg2, Mg3, Mg4) on the basis of Mg0. By measuring the differences of soil Mg, nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and calcium (Ca) leaching in different treatments during the planting period of wax gourd, evaluating soil Mg nutrient balance, and analyzing the effects of different soil and environmental factors on soil Mg leaching loss, the effects of different nutrient management measures on soil Mg leaching loss and identify the key factors that increase soil Mg leaching loss were explored. The results showed that the cumulative leaching amounts of Mg, N, P, K and Ca under Mg0 were reduced by 36.19%–40.50%, 29.68%–36.86%, 21.14%–46.74%, 39.65%–42.83% and 29.65%–48.60% compared with CK, respectively. After the application of Mg fertilizer, the cumulative leaching amounts of Mg was increased by 42.46%–78.79%, 53.94%–69.92%, 78.92%–101.83% and 133.07%–134.37% in Mg1, Mg2, Mg3 and Mg4 compared with Mg0, and the exchangeable Mg content was increased by 69.02%–81.10% and 68.70%–78.54% in Mg3 and Mg4 compared with Mg0. In addition, soil cation exchange

①基金项目: 国家自然科学基金项目(32002137)、广东省自然科学基金-青年提升项目(2023A1515030283)、广东农业科学研究院 2022—2023 年农业高水平科技示范城市佛山市专项基金建设项目(粤佛财[2021]7 号)和广东省农业科学院农业优势产业学科队伍建设项目(202303TD)资助。

* 通讯作者(plantgroup@126.com)

作者简介: 焦加斌(1995—), 男, 陕西旬阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源开发与利用。E-mail: 1064195310@qq.com

capacity (CEC) of Mg3 and Mg4 increased by 9.44%–34.93% and 14.26%–38.31% compared with Mg0, respectively. The contents of soil exchangeable Mg, rainfall, soil CEC, exchangeable Ca and available K significantly affected the leaching of soil Mg. In conclusion, in soil Mg nutrition management in wax gourd growing area of South China, attention should be paid to the application of slow Mg fertilizer and the balanced application of other fertilizers to reduce the leaching loss of Mg.

Key words: Magnesium; Nutrient management; Leaching loss; Magnesium balance; Wax gourd

镁(Mg)作为植物生长必需营养元素,在作物生长发育及产量建成中发挥着重要作用^[1]。Mg是叶绿素中心原子^[2],35%的Mg存在叶绿体中,此外Mg作为光合关键酶的辅助因子,直接参与植物的光合作用^[3]。Mg对光合产物从源到库的运输至关重要^[4],这和缺Mg限制蔗糖/H⁺转运体的功能有关^[5]。此外,Mg还参与300多种酶的活化,几乎所有的磷酸化酶和激酶都需要Mg²⁺激活^[6]。可见,Mg从植物光合产物的合成以及运输方面显著影响着作物的产量和品质^[4,7]。

植物Mg营养主要来源于土壤^[8]。李春俭等^[7]对全国土壤进行调研发现,我国土壤交换性Mg含量平均值为160.5 mg/kg,南、北方土壤交换性Mg含量存在显著差异,平均值分别为94.3、393.0 mg/kg;我国有63.6%的土壤缺Mg(低于120 mg/kg),主要分布在南方地区。这一方面是由于土壤母质含Mg量较低、降雨量大、Mg素易淋洗、离子拮抗等因素引起的^[8-9];另一方面农户在实际生产中往往会忽略镁肥的施用,加之长期不平衡施肥加快了土壤Mg库的耗竭。研究表明,土壤Mg营养缺乏严重制约华南地区冬瓜产业的可持续发展^[10]。因此,进一步探明华南地区土壤Mg营养淋洗特征,对于优化冬瓜Mg营养管理具有重要意义。

土壤Mg去向主要包括作物吸收、土壤固定、淋洗损失和地表径流^[8,11],其中土壤淋洗损失和作物吸收远高于地表径流^[12]。Mg²⁺因其离子半径小、水合半径大的特殊理化性质,在土壤溶性中的移动性较强,致使土壤胶体对其吸附能力弱,容易发生淋洗损失^[13]。在当前农业生产系统中,巨大的土壤Mg淋洗损失是导致作物缺Mg的重要原因之一^[14]。在全球尺度上^[14],农田系统和果园种植系统中每年平均Mg淋洗量为44.6 kg/hm²和103 kg/hm²;在巴西甘蔗^[15]试验中发现,每年土壤Mg淋失量为80 kg/hm²;在加拿大苹果园^[16]试验中结果表明,每年土壤Mg淋失量为118 kg/hm²;在我国西南黄壤辣椒-白菜轮作体系^[14]中,作物生长季对土壤中Mg的吸收量通常为27.5~65.5 kg/hm²,而淋失量则为26.58~57.5 kg/hm²。由此可见,Mg淋洗损失是土壤中Mg营养损失的主要途径之一。华南地区由于雨热同期加之生产中镁肥

用量不足,在冬瓜实际生产中常见大规模的Mg营养缺乏症状,严重限制冬瓜产量潜力,降低冬瓜外观及食用品质^[10]。因此,明确华南冬瓜主产区土壤Mg淋洗损失特征及影响因素,并基于此建立冬瓜Mg营养调控措施,对于解决我国华南冬瓜主产区普遍缺Mg问题具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2020年3—7月和2021年3—7月在广东省蔬菜新技术研究重点实验室(113.37°E、23.16°N)进行。供试土壤为黄壤,质地为黏土,0~20 cm耕作层土壤pH为6.30,含碱解氮243.7 mg/kg、有效磷24.2 mg/kg、速效钾293.4 mg/kg、有效钙1097.6 mg/kg、有效镁51.3 mg/kg。

2020年和2021年冬瓜种植季的降雨量和气温变化如图1所示。2020年冬瓜生长期间最高气温37.5℃,最低气温13.5℃,平均气温22.1℃,总降雨量是1126.6 mm,主要集中在5—6月;2021年冬瓜生长期间最高气温37.8℃,最低气温14.8℃,平均气温26.2℃,总降雨量是791.9 mm,主要集中在6—7月。

1.2 试验设计与田间管理

试验设置6个处理,分别是农户常规施肥(CK)、化肥减量(Mg0)及在化肥减量基础上增施30、60、90、120 kg/hm² MgO(Mg1、Mg2、Mg3、Mg4),不同处理养分投入量见表1。试验小区按照随机区组方式排列,每个处理4个小区重复,每个小区面积为50 m²。试验供试冬瓜品种为铁柱二号,供试肥料为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、硫酸钾(含K₂O 52%)和硫酸镁(含MgO 17%)。

试验于2020年3月20日和2021年3月25日选取有3~4片真叶大小均一的冬瓜幼苗定植于大田,株行距为60 cm × 150 cm。镁肥第一次作为基肥施入,在花期作为追肥第二次施入。试验施肥灌溉方式采用水肥一体化方式进行,铺设地布。在试验过程中,所有的田间管理,包括除草剂施用和病虫害的防治等,均采用当地的栽培管理方法。

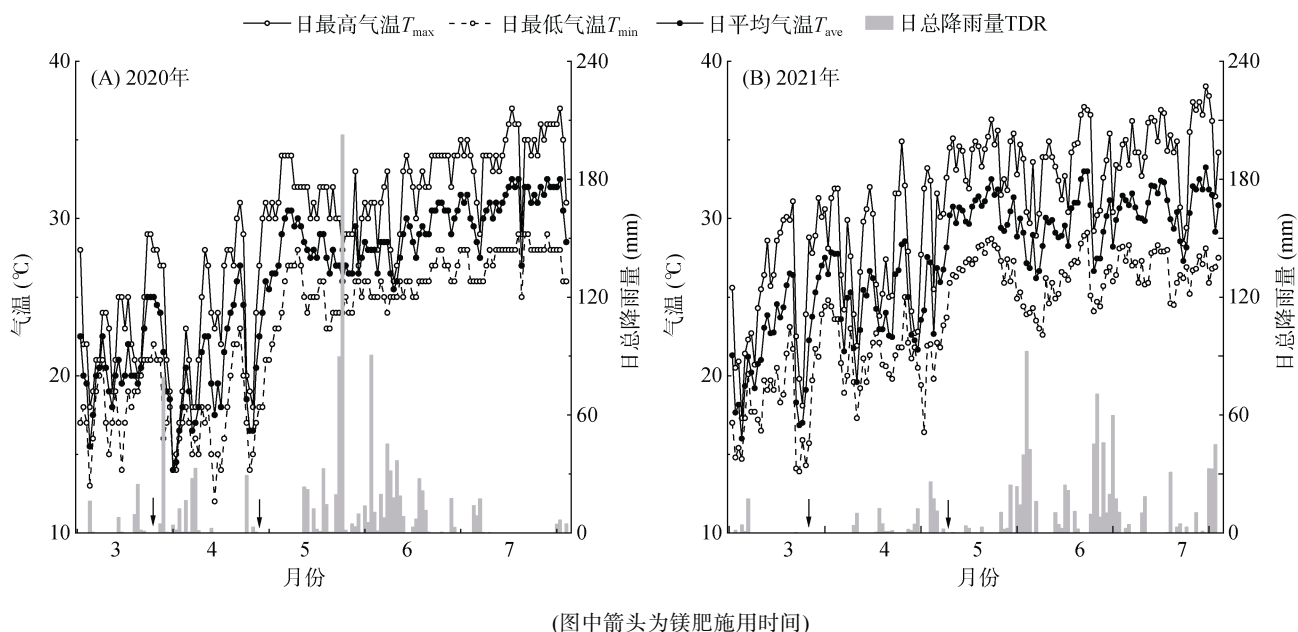


图 1 2020—2021 年冬瓜种植季降雨量和气温变化

Fig. 1 Rainfall and temperature changes during wax gourd planting seasons in 2020—2021

表 1 不同处理施肥方案

Table 1 Fertilization schemes under different treatments

处理	施肥量(kg/hm ²)			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO
CK	490	360	420	0
Mg0	350	180	375	0
Mg1	350	180	375	30
Mg2	350	180	375	60
Mg3	350	180	375	90
Mg4	350	180	375	120

1.3 土壤样品的采集与分析

土壤基础样品在前茬作物收获后冬瓜试验基肥施用前采集。以整个试验田块为采样单元，在试验田块内以“S”形均匀布点 15 个，取 0~20 cm 耕作层土壤，实验室风干磨细过 20 目和 100 目筛，供理化分析用。按常规方法测定土壤基本理化性质^[17]。按水土质量比 2.5 : 1.0 浸提，后用 pH 计测定土壤 pH；采用碱解扩散法测定土壤碱解氮；采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提-火焰光度计测定速效钾；采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定有效磷；采用 1 mol/L NH₄OAc 浸提-原子吸收分光光度法测定有效钙和有效镁；阳离子交换量采用 1 mol/L 中性乙酸铵交换法测定；盐基饱和度采用加合法进行换算。

1.4 淋洗液收集及其养分含量测定

采用农田土壤淋洗液收集装置原位收集冬瓜季土壤淋洗液，淋洗液收集装置主要包含过滤系统、储

水系统、换气系统、提液系统 4 个部分^[18](图 2)，其中过滤接水盘面积为 0.2 m²，储水箱地盘面积为 0.09 m²，该装置于 2016 年 9 月份建设。根据试验过程中实际降雨次数和降雨量采集淋洗液，防止淋洗液体积超过储水箱体积，在每次采集淋洗液时采用电子秤记录淋洗液总重量后换算成淋洗液体积，每次采集淋洗液时将储液箱中的淋洗液全部吸出、混匀，分取 200 mL 分装于洁净塑料瓶中 -20 °C 低温保存，后解冻过滤后上流动分析仪测定 N，用 ICP-OES 测定淋洗液中 P、K、Ca 和 Mg 含量。

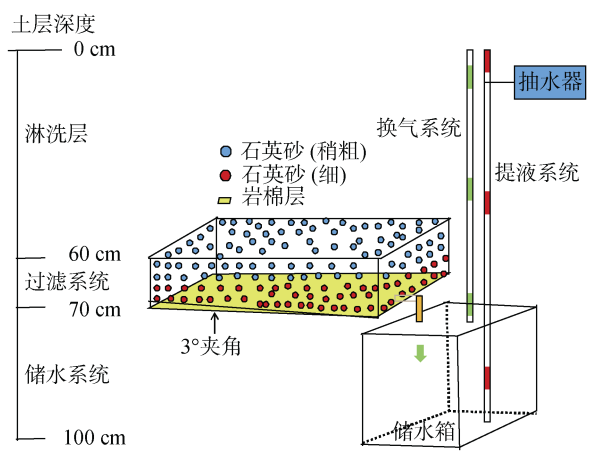


图 2 农田土壤淋洗液收集装置示意图(改自张白鸽^[18])

Fig. 2 Diagram of agricultural soil drench collection device

1.5 参数计算

作物养分积累量通过不同部位养分含量与生物

量乘积计算,作物地上部总养分带走为不同部位养分积累量之和。采用如下公式计算养分淋洗损失量和土壤 Mg 营养平衡^[11]:

$$\text{养分淋洗损失量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{相应养分淋洗液浓度} \times \text{淋洗体积} / (\text{淋洗盘表面积} \times 100)$$

$$\text{土壤 Mg 营养平衡}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \text{镁肥投入量} - \text{地上部植株带走 Mg 素总量} - \text{Mg 淋失总量}$$

1.6 数据处理

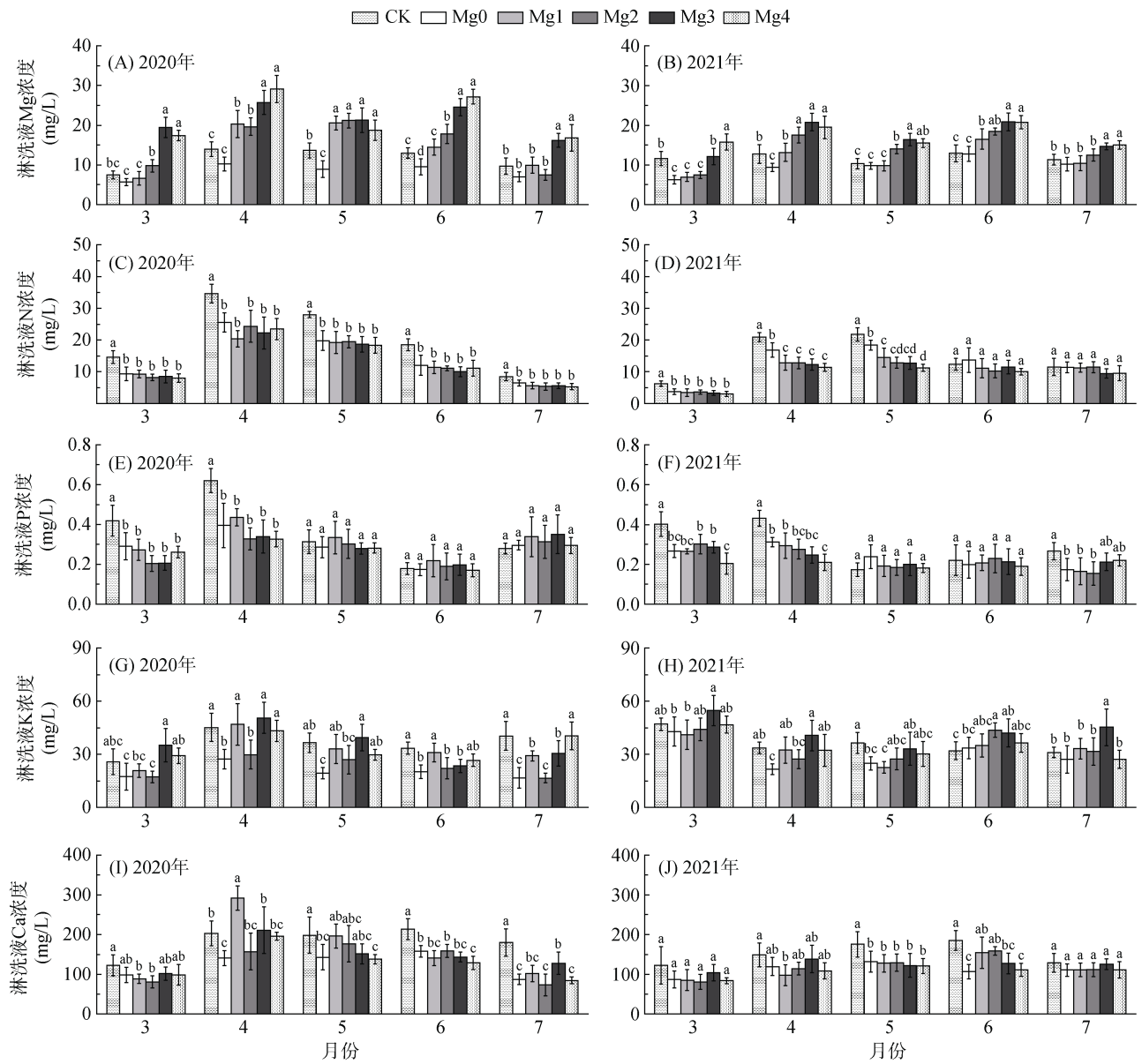
试验数据利用 Excel 进行计算处理,采用 SPSS 18.0 进行数据的统计分析,采用最小显著性差异法(LSD)检验 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性,采用 R 语言随机森林模型进行 Mg 淋洗影响因素相对重要性

分析。采用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下土壤 Mg、N、P、K 和 Ca 淋失特征

在冬瓜的生长期,淋洗液 N、P、K 和 Ca 浓度均呈先增加再降低的变化规律,而淋洗液 Mg 浓度分别在 4 月和 6 月出现两次峰值(图 3)。2020 年和 2021 年土壤淋洗液 Mg 浓度均随施 Mg 量的增加而逐渐增加,淋洗液 Mg 浓度最大值均出现在施肥后(图 3A, 3B)。2020 年 5 月和 6 月 Mg0 处理淋洗液 Mg 浓度较 CK 处理显著降低 34.62% 和 26.76%,而在 2021 年 3



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平,下同)

图 3 不同施肥处理下淋洗液中 Mg、N、P、K 和 Ca 浓度动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of Mg, N, P, K and Ca concentrations in leachates under different fertilization treatments

月和 4 月 Mg0 处理淋洗液 Mg 浓度分别较 CK 处理显著降低了 45.51% 和 26.24%。与 Mg0 处理相比, 2020 年和 2021 年 Mg1、Mg2、Mg3 和 Mg4 处理淋洗液 Mg 浓度平均增加 17.84%~129.82%、43.42%~137.15%、44.23%~243.77%、47.71%~206.58%。化肥减量后(Mg0)土壤淋洗液中 N 浓度在 3 月、4 月和 5 月显著降低, 与常规施肥处理(CK)相比分别降低 35.98%~40.39%、19.50%~26.33% 和 15.42%~29.33%(图 3C, 3D)。2020 年 Mg0~Mg4 处理之间的 N 浓度无显著差异; 2021 年 4 月和 5 月, Mg1~Mg4 处理淋洗液 N 浓度显著降低, 与 Mg0 处理相比降低 15.42%~38.85%。Mg0 处理显著降低 3 月和 4 月淋

洗液中的 P 浓度, 与 CK 处理相比分别降低 30.84%~33.55% 和 27.80%~36.33%(图 3E, 3F)。与 CK 处理相比, Mg0 处理土壤淋洗液中 K 浓度平均降低了 31.74%~47.31%; 随着镁肥用量的增加, 土壤淋洗液中 K 含量逐渐增加(图 3G, 3H)。与 CK 相比, Mg0 处理土壤淋洗液中 Ca 浓度明显降低, 在 2020 年 4 月、5 月、6 月和 7 月分别较 CK 处理降低了 30.75%、28.07%、25.92% 和 51.40%, 在 2021 年 5 月和 6 月分别较 CK 处理降低了 24.71% 和 42.49%(图 3I, 3J)。

随着试验的进行, 各处理之间 Mg、N、P、K 和 Ca 的累积淋失量呈现逐渐增加的趋势(图 4)。在冬瓜整个生长期各养分累积淋失量不同, 呈现 Ca>K>

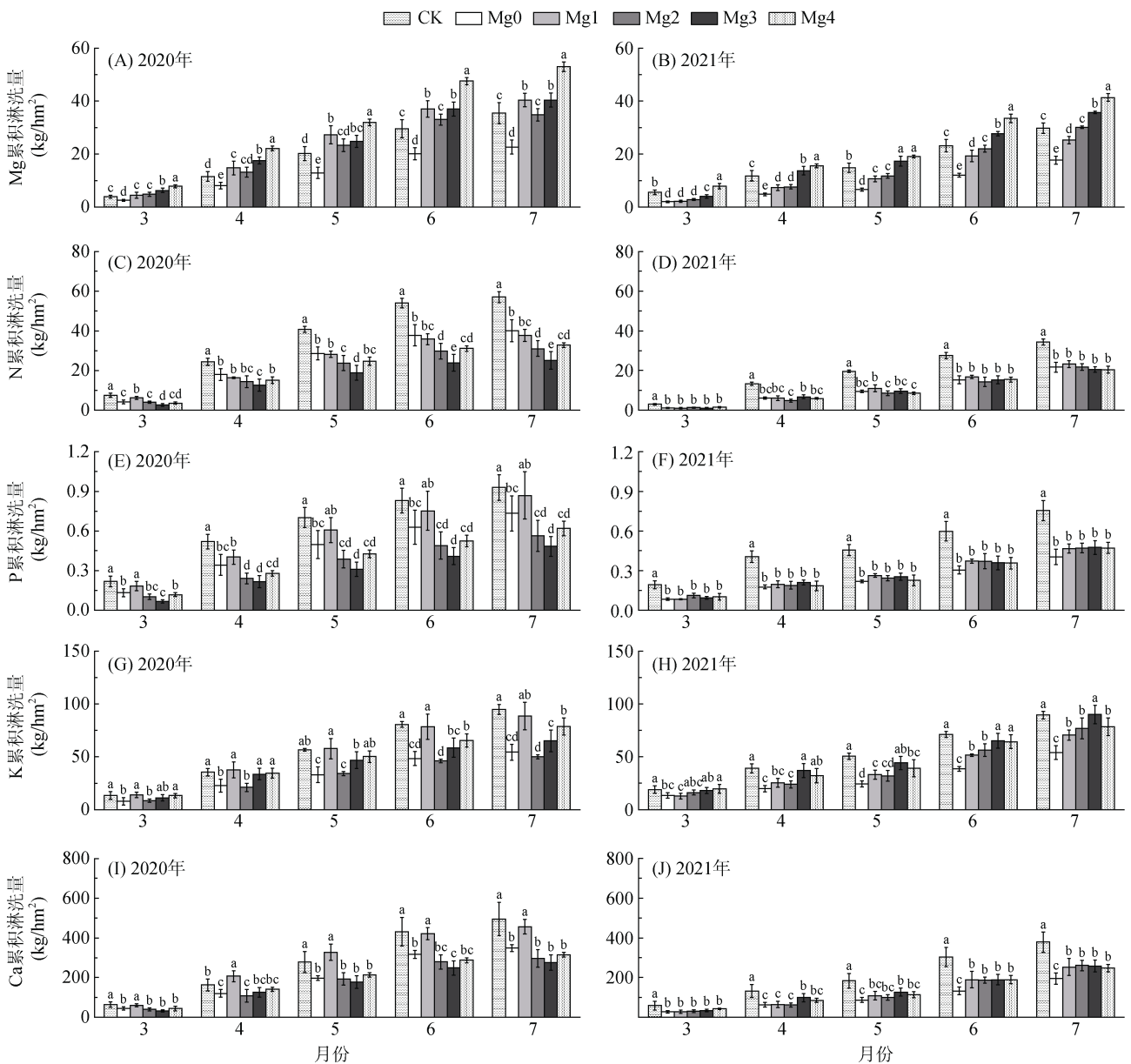


图 4 不同施肥处理下 Mg、N、P、K 和 Ca 累积淋失量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of accumulated leaching losses of Mg, N, P, K and Ca under different fertilization treatments

Mg \geq N>P 的规律。不同施肥处理下, N、P、K、Ca 和 Mg 的累积淋失量也不同, 与 CK 处理相比, Mg0(化肥减量)处理显著降低 N、P、K、Ca 和 Mg 的累积淋失量, 分别降低 29.68%~36.86%、21.14%~46.74%、39.65%~42.83%、29.65%~48.60% 和 36.19%~40.50%。随着施 Mg 量的增加, 两年 Mg 和 K 的累积淋失量逐渐增加。与 Mg0 处理相比, Mg1、Mg2、Mg3 和 Mg4 处理 Mg 累积淋失量分别显著增加了 42.46%~78.79%、53.94%~69.92%、78.92%~101.83%、133.07%~134.37%(图 4A, 4B), K 累积淋失量分别增加 30.78%~63.04%、42.28%、19.85%~66.91%、44.82%~45.66%(图 4G, 4H)。与 Mg0 处理相比, 2020 年 Mg2~Mg4 处理显著降低 N 素的累积淋洗量, 减少 18.03%~37.45%(图 4C)。2020 年 Mg3 处理显著降低 P 素的累积淋洗量, 与 Mg0 处理相比

减少 34.17%(图 4E)。在 2021 年, 与 Mg0 处理相比, Mg1、Mg2、Mg3 和 Mg4 处理 Ca 累积淋失量显著增加 27.31%~33.81%(图 4J)。

2.2 不同施肥处理下土壤理化性质差异

不同施肥处理对土壤 pH 和有机质的影响较小(表 2), 仅在 2020 年 Mg2 处理较 CK 土壤 pH 略有增加, Mg3 和 Mg4 处理土壤有机质含量较 CK 分别增加了 15.08% 和 15.31%; 而在 2021 年, 各处理之间 0~20 cm 土壤 pH 和有机质含量无显著差异。2020 年和 2021 年 Mg0 处理显著降低土壤中的碱解氮含量, 与 CK 处理相比降低了 15.37%~19.26%; 2020 年 Mg0~Mg4 处理之间的土壤碱解氮含量无显著差异, 而在 2021 年 Mg3 和 Mg4 处理土壤中的碱解氮含量较 Mg0 处理分别降低 26.05% 和 20.05%。与 CK 相比, 2020 年 Mg2 处理有效磷含量显著降低 30.23%,

表 2 不同施肥处理对 0~20 cm 土壤理化性质的影响
Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil (0~20 cm) physicochemical properties

年份	处理	pH	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	有效钾(mg/kg)
2020	CK	6.54 ± 0.33 b	21.69 ± 2.35 b	141.2 ± 7.38 a	36.59 ± 3.83 a	190.7 ± 33.0 ab
	Mg0	6.70 ± 0.13 ab	23.44 ± 0.19 ab	114.0 ± 21.6 b	30.69 ± 8.70 ab	177.6 ± 6.98 ab
	Mg1	6.81 ± 0.05 ab	22.82 ± 1.21 ab	128.8 ± 8.93 ab	29.80 ± 4.60 ab	173.0 ± 34.2 b
	Mg2	6.85 ± 0.09 a	22.65 ± 0.98 ab	117.3 ± 22.9 ab	25.53 ± 2.21 b	176.3 ± 37.2 ab
	Mg3	6.64 ± 0.12 ab	24.96 ± 2.47 a	122.6 ± 15.2 ab	31.62 ± 2.71 ab	196.0 ± 26.6 ab
	Mg4	6.71 ± 0.16 ab	25.01 ± 3.06 a	115.5 ± 8.94 b	34.72 ± 3.45 a	218.2 ± 7.08 a
2021	CK	6.48 ± 0.11 a	23.09 ± 1.60 a	143.8 ± 7.03 a	64.10 ± 3.15 a	298.8 ± 19.0 a
	Mg0	6.35 ± 0.27 a	22.53 ± 1.79 a	121.7 ± 11.0 b	52.9 ± 6.98 ab	237.2 ± 24.1 cd
	Mg1	6.54 ± 0.22 a	23.53 ± 2.14 a	103.1 ± 20.7 bc	62.0 ± 15.4 a	226.2 ± 42.7 d
	Mg2	6.70 ± 0.37 a	25.85 ± 5.71 a	123.2 ± 19.0 b	61.4 ± 13.5 a	287. ± 25.0 ab
	Mg3	6.70 ± 0.26 a	23.23 ± 2.08 a	90.0 ± 8.74 c	61.0 ± 11.4 a	279.5 ± 14.2 abc
	Mg4	6.70 ± 0.11 a	22.77 ± 2.19 a	97.3 ± 4.02 c	44.5 ± 5.18 b	251.5 ± 35.5 bed
年份	处理	交换性镁(mg/kg)	交换性钙(mg/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)	盐饱和度(%)	
2020	CK	75.0 ± 9.19 c	914.0 ± 64.3 ab	7.76 ± 0.42 bc	0.74 ± 0.04 b	
	Mg0	72.0 ± 3.02 c	830.4 ± 106.9 b	7.52 ± 0.23 c	0.70 ± 0.05 b	
	Mg1	100.4 ± 6.04 b	1 064.9 ± 94.7 a	7.79 ± 0.50 bc	0.85 ± 0.02 a	
	Mg2	83.6 ± 11.3 bc	813.0 ± 34.2 b	7.47 ± 0.36 c	0.71 ± 0.06 b	
	Mg3	130.4 ± 27.5 a	1 075. ± 223.0 a	8.23 ± 0.48 ab	0.85 ± 0.10 a	
	Mg4	128.5 ± 23.1 a	947.5 ± 80.6 ab	8.59 ± 0.26 a	0.75 ± 0.02 b	
2021	CK	91.1 ± 18.5 c	1 529.5 ± 160.5 b	10.06 ± 0.99 bc	0.92 ± 0.05 a	
	Mg0	88.9 ± 11.7 c	1 262.6 ± 99.7 b	9.12 ± 0.43 c	0.85 ± 0.06 ab	
	Mg1	114.6 ± 12.6 bc	1 277.2 ± 153.0 b	9.27 ± 0.84 c	0.86 ± 0.05 ab	
	Mg2	136.8 ± 22.2 ab	1 453.3 ± 341.4 b	11.37 ± 1.69 ab	0.81 ± 0.08 b	
	Mg3	150.3 ± 20.1 a	1 895.5 ± 254.3 a	12.30 ± 1.33 a	0.94 ± 0.05 a	
	Mg4	150.0 ± 29.3 a	1 947.5 ± 87.3 a	12.61 ± 0.28 a	0.93 ± 0.03 a	

注: 同列不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平。

2021 年 Mg4 处理有效磷含量显著降低 30.58%。2020 年和 2021 年, CK 和 Mg0 处理之间的土壤交换性镁含量无显著差异; 与 Mg0 处理相比, 两年 Mg3 和 Mg4 处理均显著增加了土壤交换性镁含量, 增幅分别为 69.02% ~ 81.10%、68.70% ~ 78.54%。2020 年 Mg1 和 Mg4 处理间 0 ~ 20 cm 土壤有效钾含量存在显著差异, 与 Mg1 相比, Mg4 处理显著增加 26.13%; 而在 2021 年, Mg0 处理土壤有效钾含量较 CK 降低了 20.62%, Mg2 处理较 Mg0 处理提高了 20.98%。两年 CK 和 Mg0 处理间土壤交换性钙含量无显著差异; 与 Mg0 处理相比, 2020 年 Mg1 和 Mg3 处理土壤交换性钙含量分别显著增加了 28.23% 和 29.44%, 2021 年 Mg3 和 Mg4 处理分别显著增加了 50.13% 和 54.25%。

本试验中 CK 和 Mg0 处理间土壤阳离子交换量无显著差异(表 2), 而 Mg3 和 Mg4 处理土壤阳离子交换量较 Mg0 处理分别增加 9.44% ~ 34.93% 和

14.26% ~ 38.31%。CK 和 Mg0 处理间土壤盐基饱和度无显著差异; 2020 年, Mg1 和 Mg3 处理土壤的盐基饱和度较 Mg0 分别增加了 15.60% 和 15.13%, 而在 2021 年, Mg0 与其他 Mg 梯度处理之间无显著差异。

2.3 不同镁肥用量下冬瓜主产区土壤 Mg 输出与平衡

淋洗损失是华南冬瓜主产区土壤 Mg 输出的主要途径, 随着施 Mg 量的增加, 淋洗损失和作物(果实、叶片和茎秆)带走 Mg 素逐渐增加(图 5A, 5B)。2020 年 Mg0、Mg1、Mg2、Mg3 和 Mg4 处理下土壤 Mg 总输出量分别为 30.84、50.26、44.59、52.70 和 64.03 kg/hm², 其中淋洗损失分别占土壤 Mg 输出总量的 73.33%、80.48%、78.11%、76.81% 和 82.80%; 2021 年 Mg0、Mg1、Mg2、Mg3 和 Mg4 处理下土壤 Mg 总输出量分别为 28.21、36.19、43.63、51.55 和 57.68 kg/hm², 其中淋洗损失分别占土壤 Mg 输出总量的 62.85%、69.80%、69.06%、69.41% 和 71.64%。

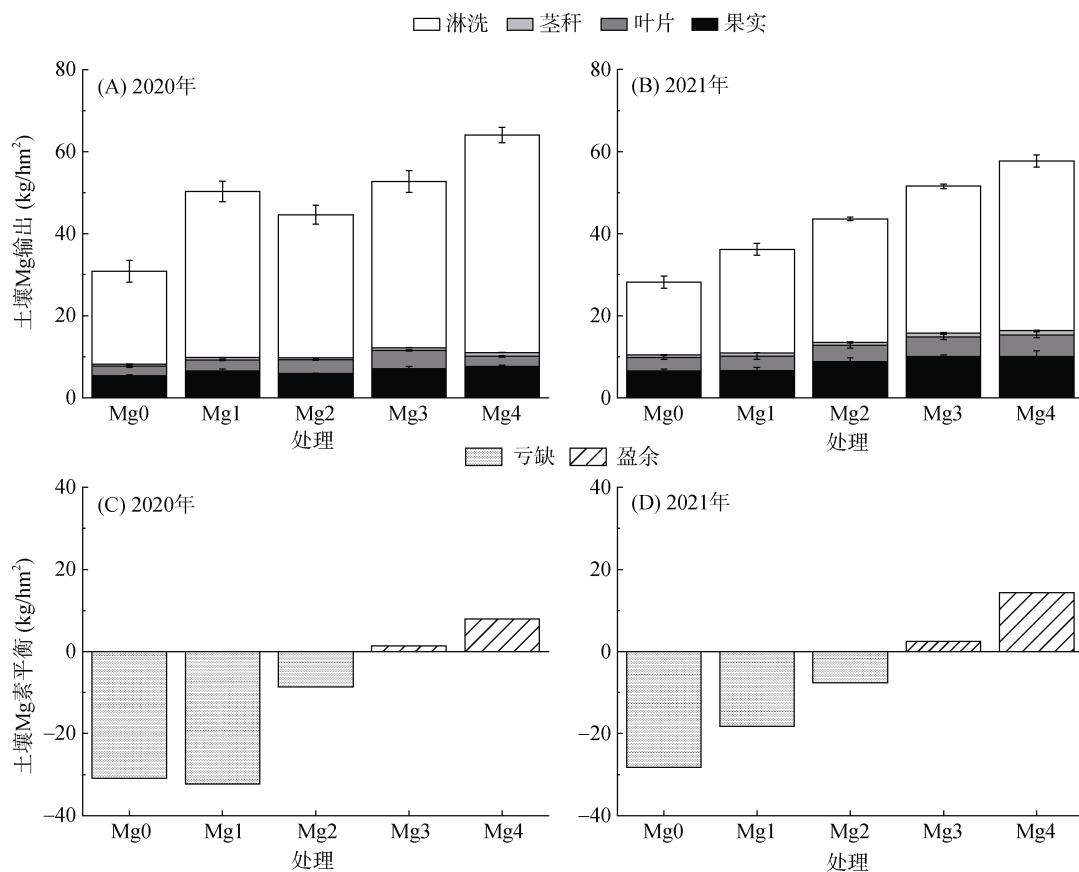


图 5 不同镁肥用量处理下土壤 Mg 素养分平衡

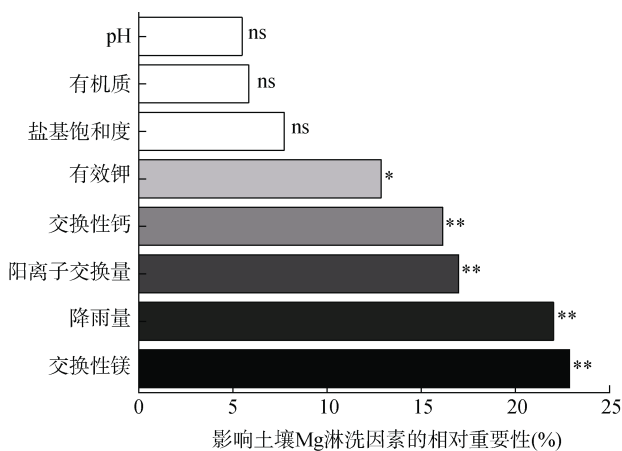
Fig. 5 Soil Mg nutrient equilibria under different Mg fertilizer dosages

随着镁肥用量的增加, 土壤 Mg 平衡逐渐扭亏为盈(图 5C, 5D)。本研究两年结果均表明在镁肥用量低于 60 kg/hm² MgO(Mg2)时土壤 Mg 营养处于持续

匮乏状态, 而在镁肥用量高于 90 kg/hm² MgO(Mg3)时土壤 Mg 营养处于盈余状态, 且随镁肥用量的持续增加土壤 Mg 盈余量逐渐增加。

2.4 Mg 淋洗量影响因素分析

采用随机森林相对重要性模型对华南冬瓜主产区土壤 Mg 淋洗影响因素进行分析发现(图 6), 在华南冬瓜主产区土壤交换性镁含量、降雨量是加剧土壤 Mg 淋洗损失的主要影响因素, 两者对土壤 Mg 淋洗量的总贡献率高达 44.89%, 分别贡献 22.87% 和 22.02%; 此外, 土壤阳离子交换量、交换性钙含量、速效钾含量对土壤 Mg 淋洗也具有显著影响, 对土壤 Mg 淋洗贡献率分别为 16.98%、16.14% 和 12.87%; 模型结果表明, 土壤盐基饱和度、有机质和 pH 对土壤 Mg 淋洗损失影响不显著, 分别占比 7.73%、5.83% 和 5.49%。



(图中*、**分别表示影响达 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平, ns 表示影响不显著)

图 6 基于随机森林相对重要性模型分析土壤 Mg 淋洗主要影响因素

Fig. 6 Influencing factors of soil Mg leaching based on relative importance model of random forest

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤 Mg、N、P、K 和 Ca 淋洗的影响

菜地土壤中的矿质养分主要来源于肥料的施用, 近年来, 盲目大量和不合理施用化肥, 已经成为华南地区冬瓜种植过程中的普遍现象^[10, 19]。而超出冬瓜生长需求的养分会累积在土壤剖面, 结合华南地区雨热同期的气候, 造成大量的淋洗损失^[19]。因此合理施肥是减少养分淋洗损失的有效措施^[20]。本试验中, 冬瓜生长期, 农户常规处理(CK)下土壤的 N、P、K、Ca 和 Mg 的累积淋失量显著大于化肥减量处理(Mg0)(图 4), 这和化肥的大量投入使用有关^[13, 21]。土壤中的 N、P、K、Ca 和 Mg 的淋洗液浓度和累积淋洗量均呈现 $Ca > K > Mg \geq N > P$ 的规律(图 3 和图 4),

这和前人的研究结果基本一致^[8, 11]。2020 年 Mg3 处理降低了 N、P 元素的淋洗量, 可能是由于使用镁肥增加了冬瓜对 N 和 P 元素的吸收^[22]。随着施 Mg 量的增加, 淋洗液的 Mg 浓度和累积淋失量逐渐增加(图 3 和图 4), 这和前人的研究结果也一致^[9, 11]。淋洗液的 Mg 浓度最大时期均出现在施肥后, 随着冬瓜的生长, Mg 浓度先增加再逐渐降低(图 3)。随着施 Mg 量的增加, 土壤 Ca 和 K 的流失量也在增加(图 4), 与 Baier 等^[23]和王昱桁^[11]研究结果相似。主要是由于土壤胶体表面离子位点被 Mg^{2+} 竞争, 使 Ca^{2+} 、 K^+ 被大量浸出导致其淋洗损失总量增加。2020 年和 2021 年淋洗液的 N、P、K、Ca 和 Mg 的浓度和累积淋失量的差异可能主要是由两年的降雨量差异造成的^[24], 2020 年冬瓜生长期的降雨量为 1 126.6 mm, 2021 年冬瓜生长期的降雨量为 791.9 mm。

3.2 不同施肥处理对土壤 N、P、K、Ca 和 Mg 等养分的影响

土壤养分是反映土壤理化性质的重要指标, 是作物高产的基础^[25], 施肥是提高土壤肥力和作物高产的重要农艺措施^[26]。近年来, 人们为了获得作物高产效益, 长期大量不合理施用化肥, 导致土壤的养分失调、水资源污染和植物生长不良等一系列问题^[25]。因此进行优化施肥的研究, 对于提高作物产量和品质, 增加农民收入, 保护环境有着重要意义^[27]。冬瓜的需肥量很大^[28], 焦加斌等^[29]研究表明养分吸收总量表现为 $K > N > Ca > P > Mg$, 分别为 293、104、103、24 和 20 kg/hm^2 。因此在进行优化施肥后, 对养分的影响对于后期科学施肥至关重要。本文通过测定土壤的 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、阳离子交换量和盐基饱和度, 探讨不同施肥处理对土壤肥力的影响。在 2020 年, CK 处理导致土壤的 pH 和有机质含量降低(表 2), 这和氮肥的过量投入导致土壤酸化有关^[13, 30]。与 CK 处理相比, 进行减肥优化后, Mg0 处理下显著降低了土壤中碱解氮的含量, 这可能是由于氮肥投入的减少; 与 Mg0 处理相比, 2021 年施 Mg 量显著降低了 Mg3 和 Mg4 处理土壤碱解氮含量(表 2), 这可能与镁肥增加冬瓜对土壤中氮的吸收有关^[22]。与 CK 相比, 进行减肥优化后, Mg0 处理下土壤的交换性钙、镁和速效钾的含量无显著差异(表 2)。与 Mg0 处理相比, Mg3 和 Mg4 处理显著提高了 0 ~ 20 cm 土壤的交换性镁的含量(表 2), 这和前人的研究结果一致^[11]。与 Mg0 处理相比, 2020 年和 2021 年施用镁肥对土壤中的速效钾和交换性钙含量的影响不一致(表 2), 这可能一方面由于

K-Mg 和 Ca-Mg 之间的离子拮抗作用,减少了植株的吸收^[31];另一方面通过 Mg 与土壤的吸附位点的竞争,增加了土壤的速效钾和交换性钙的淋洗^[11,13],具体机理还有待进一步探究。土壤阳离子交换量是土壤的基本特性和重要肥力影响因素之一,它直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力^[32]。土壤交换性盐基离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺和Na⁺)是土壤质量的重要表征,在维持土壤养分与缓冲性中起到重要作用^[32]。前人研究表面土壤阳离子交换量<10 cmol/kg,说明其土壤保肥能力较弱^[17];土壤盐基饱和度>50%,土壤肥力较高^[17]。在本试验中与 CK 相比,Mg0 处理后土壤的阳离子交换量和盐基饱和度没有显著降低(表 2),说明减肥对土壤的保肥能力和土壤肥力无显著影响。施用镁肥可以显著增加土壤的阳离子交换量,对盐基饱和度无显著影响(表 2),这和土壤中的 Mg²⁺ 增加有关。

3.3 不同施肥处理对土壤 Mg 素平衡的影响及土壤 Mg 淋洗的主要影响因素

土壤中的 Mg 淋洗损失总量与施肥量之间表现出正相关,大量的 Mg 素淋洗损失导致土壤的 Mg 平衡被打破^[11]。本研究发现,Mg 素淋洗带走量占 Mg 素总带走量的 62.85%~82.80(图 5),土壤 Mg 素淋洗而导致的损失量远远大于作物本身吸收带走的 Mg 素养分,是导致土壤缺 Mg 最主要的原因^[11]。2020 年和 2021 年的 Mg0、Mg1、Mg2 处理下,土壤 Mg 素均处于亏损状态,Mg3 和 Mg4 处理下的土壤 Mg 素处于盈余状态(图 5),两年土壤 Mg 盈余量差异的主要原因是由于降雨量的不同。前人研究表明,影响土壤中水溶性 Mg 淋洗的主要因素有气候(降水)、土壤类型、pH 以及与其他元素互作^[13]。通过对田间原位监测两年的土壤 Mg 淋洗因素进行随机森林分析,发现土壤 Mg 淋洗主要影响因素是土壤交换性镁的含量、交换性钙的含量、速效钾的含量、阳离子交换量和降雨量(图 6)。这和前人的研究结果大体相似^[13],不同的是本试验采用田间原位监测不同处理之间的 pH 和有机质的变化不大,因此进行随机森林分析时没有显著影响。冬瓜在田间种植过程中,不可控的因素众多,但是可以通过掌握冬瓜的养分吸收规律^[27],对施肥量、施肥种类、施肥方式和施肥次数进行科学调控,减少 Mg 素的淋洗。

4 结论

1) 在冬瓜整个生长期,土壤养分累积淋洗量表现为 Ca>K>Mg≥N>P。与农户常规施肥(CK)相比,

减肥(Mg0)可以降低冬瓜生长期内 Mg、N、P、K 和 Ca 的累积淋洗量,并且对土壤的阳离子交换量和盐基饱和度无显著影响。

2) 随着施 Mg 量的增加,土壤中的淋洗液 Mg 浓度和 Mg 累积淋洗量逐渐增加,也增加土壤 K 和 Ca 的淋洗。土壤的 Mg 素淋洗是华南地区冬瓜田间土壤 Mg 素最主要的去向。为防止土壤 Mg 库的耗竭,建议施用 90~120 kg/hm² MgO。

3) 影响华南地区土壤 Mg 素淋洗的主要因素是土壤交换性镁的含量、降雨量、阳离子交换量、交换性钙和速效钾的含量。因此建议在生产上降雨量大的情况下,在基肥和花期采用土施镁肥配合覆膜和缓释性强的镁肥,平衡施肥,减少土壤 Mg 素的淋洗。

参考文献:

- [1] 林敏霞, 张晓东, 邱美欢, 等. 植物镁素生理功能及镁素营养诊断和施用[J]. 热带农业科学, 2016, 36(3): 39-43.
- [2] 李娟. 植物钾、钙、镁素营养的研究进展[J]. 福建稻麦科技, 2007, 25(1): 39-42, 30.
- [3] Tian X Y, He D D, Bai S, et al. Physiological and molecular advances in magnesium nutrition of plants[J]. Plant and Soil, 2021, 468(1/2): 1-17.
- [4] Jiao J B, Li J L, Chang J J, et al. Magnesium effects on carbohydrate characters in leaves, phloem sap and mesocarp in wax gourd (*Benincasa hispida* (thunb.) cogn.)[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 455.
- [5] Ayre B G. Membrane-transport systems for sucrose in relation to whole-plant carbon partitioning[J]. Molecular Plant, 2011, 4(3): 377-394.
- [6] Yan B, Hou Y. Effect of soil magnesium on plants: A review[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 170: 022168.
- [7] 李春俭, 王正, 张福锁. 镁肥在我国主要作物上的提质增效作用[J]. 中国土壤与肥料, 2022(3): 1-6.
- [8] 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.
- [9] 姜亚男, 张亚东, 杨文浩, 等. 镁肥与添加剂施用后土壤镁迁移与淋洗特征研究[J]. 土壤, 2021, 53(1): 80-87.
- [10] Zhang B G, Cakmak I, Feng J C, et al. Magnesium deficiency reduced the yield and seed germination in wax gourd by affecting the carbohydrate translocation[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 797.
- [11] 王昱桁. 柑橘园镁素淋洗特征与缺镁调控研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [12] Bertol I, Guadagnin J C, González A P, et al. Soil tillage, water erosion, and calcium, magnesium and organic carbon losses[J]. Scientia Agricola, 2005, 62(6): 578-584.
- [13] 杨文浩. 土壤中镁的淋洗及镁肥应用建议[J]. 中国农资, 2018(38): 22.
- [14] 卢明. 西南黄壤辣椒-白菜轮作系统的镁营养调控与品

- 质效应[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [15] de Oliveira M W, Trivelin P C O, Boaretto A E, et al. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2002, 37(6): 861–868.
- [16] Neilsen G H, Stevenson D S. Leaching of soil calcium, magnesium, and potassium in irrigated orchard lysimeters[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(4): 692–696.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 张白鸽. 华南露地苦瓜生产体系的氮素调控[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [19] 范新. 适于广东典型设施菜地的填闲蔬菜及其氮磷淋失阻控效果评价[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2020.
- [20] Gransee A, Führs 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): 5–21.
- [21] 王大鹏, 郑亮, 吴小平, 等. 旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(12): 1731–1741.
- [22] 李灿, 陈晓东, 郑卓越, 等. 镁和微量矿质元素对黑皮冬瓜外观和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(4): 49–55.
- [23] Baier R, Ettl R, Hahn C, et al. Early development and nutrition of Norway spruce (*Picea abies*(L.) Karst.) seedlings on different seedbeds in the Bavarian limestone Alps—a bioassay[J]. *Annals of Forest Science*, 2006, 63(4): 339–348.
- [24] 关共凑, 魏兴琥. 自然降雨对粤北岩溶区土壤钙、镁离子流失影响模拟试验[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 73–76, 83.
- [25] 常海刚, 李广, 袁建钰, 等. 不同施肥方式对甘肃陇中黄土丘陵区土壤养分及春小麦产量的影响[J]. *作物杂志*, 2022(5): 160–166.
- [26] 刘强, 穆兴民, 王新民, 等. 长期不同施肥方式对旱地轮作土壤养分和作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 122–128.
- [27] 郭俊杰. 优化施肥下作物稳产增效潜力与土壤微生物学特征研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [28] 何永梅, 王迪轩. 冬瓜科学施肥及注意事项[J]. *长江蔬菜*, 2020(19): 71–73.
- [29] 焦加斌, 陈晓东, 郑朝元, 等. 黑皮冬瓜干物质和养分吸收与分配的动态规律[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(18): 62–69.
- [30] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(S1): 81–84.
- [31] 刘芳. 钾镁互作对番茄生长、产量及钾、钙、镁养分吸收的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [32] 范庆锋, 虞娜, 张玉玲, 等. 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1132–1137.