

有机肥配施保水剂对紫色土水分入渗及氮素淋溶的影响

蒋美佳, 刘晓林, 冯钰梅, 李凡, 何秀琴, 邓晓悦, 李玉义, 孔凡磊

(四川农业大学农学院, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130)

摘要: 以有机肥、保水剂(聚丙烯酰胺 PAM、高分子吸水树脂 SAP 和沃特)为供试材料, 通过室内土柱模拟试验, 研究有机肥配施保水剂对紫色黏土水分入渗及氮素淋溶的影响。结果表明: 有机肥配施保水剂可有效增加土壤的保水保肥能力, 是控制土壤水分和养分淋失的有效措施。单施有机肥和有机肥配施保水剂均降低了湿润锋运移深度和入渗速率。与对照相比, 单施有机肥和有机肥配施保水剂处理的湿润锋运移深度降低了 33.33%~46.49%, 入渗速率降低了 22.73%~31.82%, 累计淋溶液体积降低了 1.25%~6.78%。施用有机肥有一定增肥保肥能力, 但随淋洗次数增加保肥能力逐渐降低, 与对照相比, 在持续淋溶条件下单施有机肥的硝态氮和全氮累计损失率分别升高了 12.00%, 17.51%。有机肥配施保水剂可有效减少氮素淋失量, 降低氮素淋失率, 提高土壤保肥能力。与施用有机肥相比, 有机肥配施保水剂硝态氮损失率降低了 35.49%~78.46%, 全氮损失率降低了 35.53%~71.85%, 其中有机肥配施 PAM 处理保水保肥效果最好。

关键词: 有机肥; 保水剂; 紫色土; 水分入渗; 氮素淋溶

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)05-0099-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.015

Effect of Organic Fertilizer Combined with Water-retaining Agent on Water Infiltration and Nitrogen Leaching of Purple Soil

JIANG Meijia, LIU Xiaolin, FENG Yumei, LI Fan, HE Xiuqin,

DENG Xiaoyue, LI Yuyi, KONG Fanlei

(Key Laboratory of Crop Eco-physiology and Farming System in Southwest China, College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: Using organic fertilizer, water-retaining agent (polyacrylamide PAM, polymer water-absorbent resin SAP and Water) as test materials, the effects of organic fertilizer combined with water-retaining agent on water infiltration and nitrogen leaching of purple soil were studied through indoor soil column simulation test. The results showed that organic fertilizer combined with water-retaining agent could effectively increase soil water and fertilizer retention capacity, and was an effective measure to control soil water and nutrient leaching. Single application of organic fertilizer and application of organic fertilizer combined with water-retaining agent both could reduce the wetting front migration depth and infiltration rate. Compared with the control, the wetting front migration depth of the above two treatments decreased by 33.33% ~ 46.49%, the infiltration rate decreased by 22.73% ~ 31.82%, and the cumulative leaching solution volume decreased by 1.25% ~ 6.78%. The application of organic fertilizer had a certain fertilizer-preserving ability, but the fertilizer-retaining capacity gradually decreased with the increasing of leaching times. Compared with the control, the cumulative loss rates of nitrate nitrogen and total nitrogen increased by 12.00% and 17.51%, respectively, under continuous leaching. Organic fertilizer combined with water-retaining agent could effectively reduce nitrogen leaching amount and nitrogen leaching rate, and improve soil fertility retention capacity. Compared with the application of organic fertilizer, the nitrate loss rate and the total nitrogen loss rate of organic fertilizer combined with water retention agent treatment decreased by 35.49% ~ 78.46% and 35.53% ~ 71.85%,

收稿日期: 2019-03-03

资助项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAC05B05); 国家重点研发计划项目(2017YFD0301704)

第一作者: 蒋美佳(1997-), 女, 本科生, 主要从事紫色土改良研究。E-mail: 499134739@qq.com

通信作者: 孔凡磊(1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事农作制度与农业资源高效利用技术研究。E-mail: kflstar@163.com

respectively. Among them, organic fertilizer combined with PAM had the best effect of water retention and fertilizer retention.

Keywords: organic fertilizer; water retaining agent; purple soil; water infiltration; nitrogen leaching

紫色土广泛分布于四川盆地,是当地主要的耕地资源。紫色土发育较浅,存在耕层浅薄、土壤结构差、蓄水能力差、有机质含量低、水土流失严重等问题^[1]。在暴雨和灌溉条件下,紫色土极易遭受侵蚀,造成严重的水土流失,从而产生土壤退化、干旱缺水等问题,严重制约了农业生产能力的提高^[2]。因此,提高紫色土保水保肥能力,改善水肥流失状况是促进四川旱地农业可持续发展的关键。前人^[3]研究表明,施用有机肥可有效减少地表径流,提高土壤中有效水的含量,协调土壤供水与作物需水之间的矛盾。除此以外,有机肥料的施用能提高氮肥利用效率,减少因渗漏、径流等造成的氮素损失,并在很大程度上改善单施化肥不当所造成的对土壤和环境的负面影响^[4]。保水剂是近年来迅速发展起来的一种新型高分子材料,能吸收自身重量几百倍的水分,吸收的水分可缓慢释放供作物吸收利用,且具有反复吸收和释放水分的功能,可增强土壤保水性,减少土壤水分、养分流失,在提高土壤保水保肥能力方面发挥重要作用^[5]。有研究^[6]指出,保水剂不仅能够提高土壤持水性,改善土壤结构,施入土壤后还可直接或间接影响土壤中氮素转化,增强土壤的硝化作用,提高土壤肥料元素离子的抗淋溶性,从而增强土壤保肥能力,提高土壤肥力。但单一施用有机肥或保水剂改良效果不全面,甚至会造成不同程度的负面影响^[7-8]。近年来,有机物质和保水剂配合施用引起较多学者^[9-10]的关注。秸秆配施保水剂能增加水分入渗,有效保持土壤水分^[9]。有机肥配施保水剂后可增加作物对氮、磷养分的吸收,促进作物生长;同时改善土壤理化性质,提高作物产量^[10]。前人对施用有机肥或保水剂下土壤保水保肥能力进行了大量研究,同时也对有机肥与保水剂配施对作物养分吸收利用和产量的影响进行了相关研究,但鲜见有机肥配施不同保水剂对土壤水分入渗及养分淋溶影响的研究报道。因此,本研究以有机肥和保水剂(聚丙烯酰胺(PAM)、高分子吸水树脂(SAP)、沃特保水剂)为供试材料,通过室内土柱模拟试验,探究有机肥配施保水剂对紫色黏土水分入渗及氮素淋溶的影响,以期有有机肥配施保水剂提高紫色黏土保水保肥能力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤 本研究于 2018 年 5—8 月在四川

农业大学第 3 教学实验楼进行。供试土壤于 2017 年 9 月采自四川中江农场,土壤类型为紫色土,采样深度为 0—20 cm,土壤容重为 1.38 g/cm³。土样去除杂质后,自然风干,过 2 mm 筛备用。供试土壤全氮含量为 1.40 g/kg,硝态氮含量为 26.58 mg/kg,pH 为 5.8,有机质含量为 11.12 g/kg。

1.1.2 供试材料 有机肥由成都盖尔盖司生物科技有限公司提供,主要成分为菌渣堆肥,全氮含量 10.90 g/kg,有机质含量 224.91 g/kg;聚丙烯酰胺(PAM)由山东宝莫生物化工股份有限公司生产提供,阴离子型,分子量 > 700 万,可反复吸放水,吸水倍率 500 倍;沃特保水剂由胜利油田长安控股集团有限公司生产提供,主要成分为钾盐型聚丙烯酰胺,由丙烯酰胺与凹凸棒土(Attapulgate)杂化工艺合成,可反复吸放水,吸水倍率 300 倍;高分子吸水树脂(SAP)是利用强吸水树脂和淀粉等材料制成的高分子聚合物,可反复吸放水,吸水倍率 200 倍。

1.2 试验设计

采用室内土柱模拟试验,设置 5 个处理,分别为空白(CK)、施用有机肥(T1)、有机肥配施 PAM(T2)、有机肥配施 SAP(T3)、有机肥配施沃特保水剂(T4)。有机肥和保水剂施用量参考前人^[5,11]相关研究设计,每根土柱装土 5 kg,有机肥按 12 000 kg/hm²施用,每根土柱施用 11.4 g,保水剂按 60 kg/hm²施用,每根土柱施用 0.045 2 g。试验用土柱为有机玻璃管(高 500 mm,内径 110 mm),有机肥及保水剂混施于 0—10 cm 土壤中,整根土柱按 1.35 g/cm³的容重装填。装填时将土柱分为 3 部分,底部为 50 mm 淋溶层,用洗净的碎石子(直径 ≥ 2 mm)装填,中间 400 mm 为填土区,上部 50 mm 为灌水区。土柱填装完成后,先加 2 000 mL 去离子水记录水分运移情况,水分入渗试验结束后,将土柱静置 48 h,而后进行氮素淋溶试验。模拟施用量为 N 225 kg/hm²,在土柱中加入 10 mL 0.21 mol/L KNO₃溶液。静置 1 h 后加 100 mL 去离子水,收集淋溶液,此为第 1 次淋洗。每隔 3 天淋洗 1 次,去离子水用量均为 100 mL,共淋洗 7 次,测定淋溶液体积、硝态氮含量、全氮含量。

1.3 测定指标与方法

采用一维垂直积水入渗法^[12]测定土壤入渗性状。用烧杯持续加入 2 000 mL 去离子水,并且始终保持水层厚度为 3 cm,入渗开始后,连续记录一定时间内垂直

湿润锋运移距离,当湿润锋运移至土柱底端时停止记录但持续供水直至有淋溶液渗出。每次淋洗后用烧杯收集淋溶液测定淋溶液体积,采用酚二磺酸比色法测定淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量;采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定淋溶液全氮含量^[13]。

入渗速率(cm/min) = 湿润锋运移距离(cm)/时间(min)

氮素损失率($\%$) = 淋溶液氮素量(mg) \times 100/施加氮素量(mg)

1.4 数据统计与分析

利用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析,多重比较采用最小显著差异法(LSD),显著性水平设定为 0.05,采用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 有机肥配施保水剂对土壤水分入渗的影响

2.1.1 湿润峰运移 湿润峰是土壤水分下渗过程中湿润层下缘与干土区的交界面^[14]。由图 1 可知,随入渗时间逐渐增加,各处理土壤湿润锋一维垂向运动距离逐渐增加;施用有机肥对湿润锋运移影响不明显,而有机肥配施保水剂可有效降低相同时间内湿润锋运移的深度。与 CK 相比,75 min 时 T2、T3、T4 处理湿润峰运移深度分别降低了 33.33%, 45.61%, 46.49%。在 1 815 min 内,各处理运移的深度分别是 CK(35.01 cm), T1(35.60 cm), T2(29.87 cm), T3(35.01 cm), T4(34.32 cm),其中 T2 湿润峰运移深度最低,较对照处理降低了 14.68%。

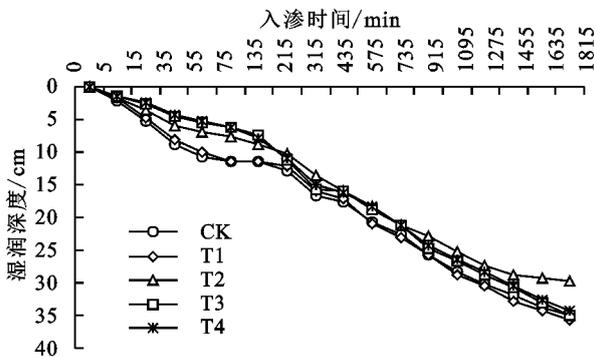


图 1 不同处理下湿润锋位置

2.1.2 土壤水分入渗速率 由图 2 可知,土壤水分入渗速率随入渗时间呈现快速降低并趋于稳定的变化趋势,施用有机肥和有机肥配施保水剂均能明显降低前期土壤水分入渗速率。各处理土壤水分入渗速率表现为:CK>T1>T2>T3>T4,与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 处理最大土壤水分入渗速率分别降低了 22.73%, 25.91%, 29.55%, 31.82%。说明施用有机肥和有机肥配施保水剂能有效减缓水分在土壤中的运移速度,延

长水分在土体中保持时间。

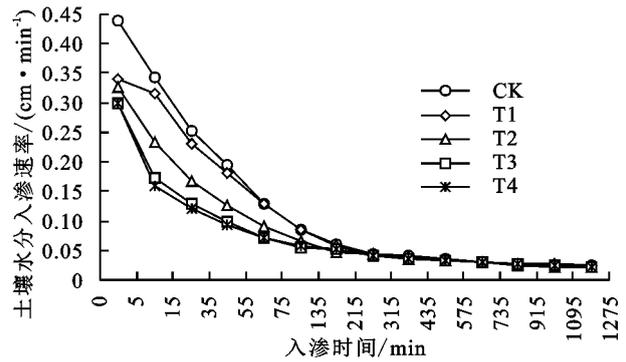


图 2 不同处理下土壤水分入渗速率

2.2 有机肥配施保水剂对淋溶液体积的影响

由图 3 可知,施用有机肥与有机肥配施保水剂均有效减少了淋溶液体积,不同保水剂与有机肥配施的效果存在差异。整个淋溶过程中,CK、T1、T2、T3、T4 处理累计淋溶量分别为 685.00, 676.52, 641.50, 667.20, 659.70 mL, T1、T2、T3、T4 处理累计淋溶量较 CK 分别降低了 1.24%, 6.35%, 2.60%, 3.69%。可见,施用有机肥及有机肥配施保水剂均有效减少了土壤水分淋失,其中有机肥配施 PAM 保水效果最好,其次为配施沃特和 SAP 处理。

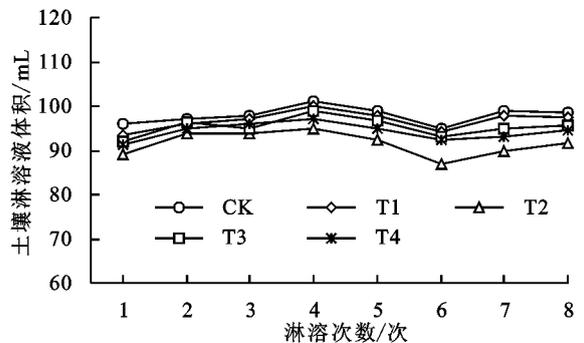
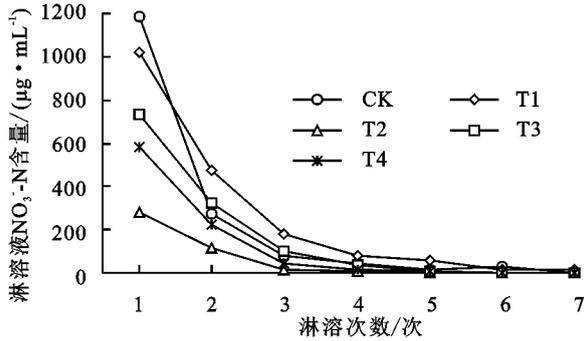


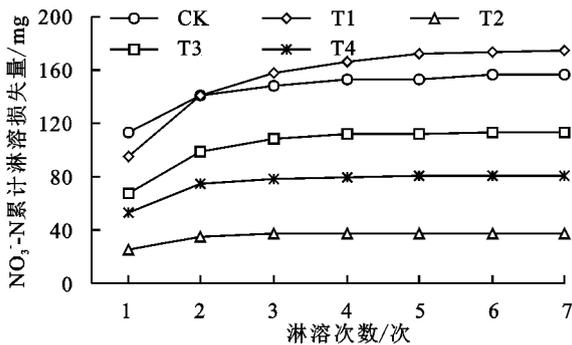
图 3 不同处理下土壤淋溶液体积

2.3 有机肥配施保水剂对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶量的影响

2.3.1 淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量 由图 4 可知,随着淋溶次数的增加,淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量逐渐降低。施用有机肥除降低了第 1 次淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量外,均增加了其他淋溶时期淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,这可能是第 1 次淋溶有机肥对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 具有吸附作用,而随后淋溶过程中有机肥吸附和自身存在的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋出,从而导致淋溶液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增加。与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 处理第 1 次淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量分别降低了 16.31%, 78.17%, 40.81%, 53.51%,其中 T2 处理与 CK 的差异明显。有机肥配施保水剂降低了淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,不同类型保水剂降低淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的效果存在差异,淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量总体表现为 T3>T4>T2,其中 T2、T4 处理各时期淋溶液 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均低于 CK。

图 4 不同处理下淋溶液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量

2.3.2 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋溶损失量 由图 5 可知,随着淋溶次数的增加, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋溶损失量呈现快速增加随后趋于稳定的变化趋势。除第 1 次淋溶外,其他各时期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋溶损失量均表现为 $\text{T1} > \text{CK} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T2}$ 。可见,单独施用有机肥可降低第 1 次淋溶 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶损失量,但增加了后面各次淋溶时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶损失量。有机肥配施保水剂能有效降低紫色土土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋失量,与 T1 相比,T2、T3、T4 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋溶损失量分别降低了 78.46%, 35.50%, 53.97%。由此可知,随着淋洗次数增加施用有机肥处理对土壤保肥能力逐渐降低,而有机肥配施保水剂能有效减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失,保持土壤中的速效氮,增强土壤的保肥能力。从保水剂种类看,有机肥配施 PAM 处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋溶损失量最小,其次为配施保水剂沃特和 SAP 处理。

图 5 不同处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累计淋溶损失量

2.4 有机肥配施保水剂对全氮淋失量的影响

2.4.1 淋溶液全氮含量 由图 6 可知,随着淋溶次数的增加,淋溶液全氮含量呈现快速降低后趋于稳定的变化趋势,施用有机肥增加了淋溶液全氮含量,而有机肥配施保水剂能有效降低淋溶液全氮含量。第 1 次淋溶液全氮含量表现为 $\text{T1} > \text{CK} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T2}$,与 CK 相比,T1 处理淋溶液全氮含量增加了 6.24%,而 T2、T3、T4 处理分别降低了 65.93%, 35.36%, 39.73%。施用有机肥会增加紫色土淋溶液全氮含量,但有机肥配施保水剂可明显降低淋溶液全氮含量,增

强土壤保肥能力。

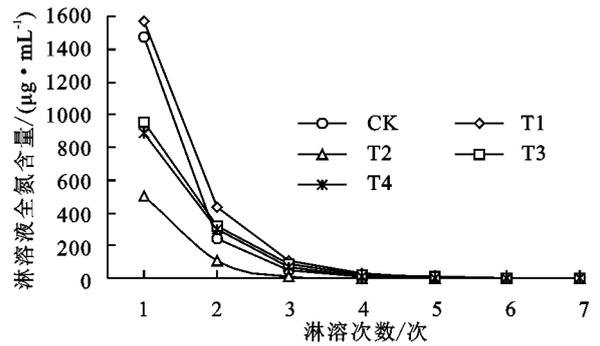


图 6 不同处理下淋溶液中全氮含量

2.4.2 全氮累计淋溶损失量 由图 7 可知,随着淋洗次数的增加,全氮累计淋溶损失量逐渐升高,最终趋于稳定,各处理全氮累计淋溶损失量表现为 $\text{T1} > \text{CK} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T2}$ 。施用有机肥增加了全氮累计淋失量,与 CK 相比,T1 处理全氮累计淋失量增加了 17.47%。有机肥配施改良剂能有效降低全氮累计淋失量,与 T1 相比,T2、T3、T4 处理全氮累计淋失量分别降低了 71.85%, 35.53%, 41.56%。

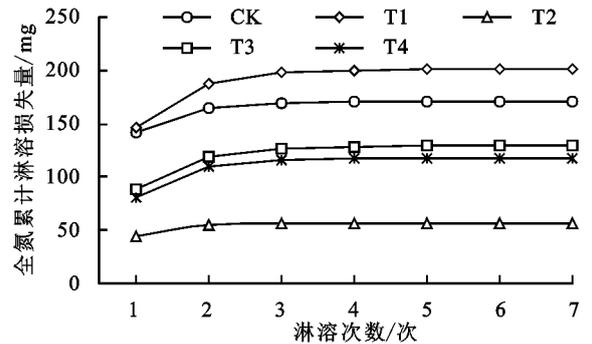


图 7 不同处理下淋溶液中全氮累计淋溶损失量

2.5 有机肥配施保水剂对氮素淋失率的影响

由图 8 可知,在持续淋溶条件下单施有机肥会增加土壤氮素累计损失率,而有机肥配施保水剂则能有效降低氮素淋失率。

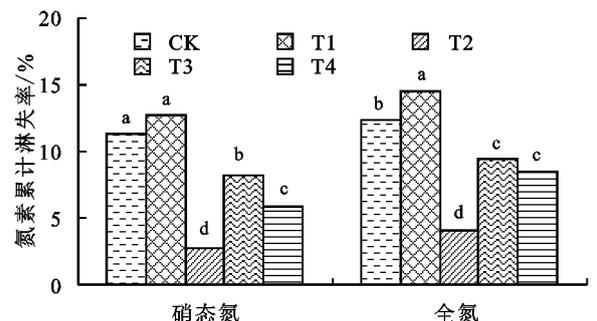


图 8 不同处理下硝态氮和全氮累计淋失率

各处理硝态氮淋失率表现为 $\text{T1} > \text{CK} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T2}$,全氮淋失率表现为 $\text{T1} > \text{CK} > \text{T3} > \text{T4} > \text{T2}$ 。与 CK 相比,T1 处理硝态氮和全氮淋失率分别提高了 12.00%, 17.51%,这可能是由于持续淋溶下有机肥自身所含氮素养分被淋失造成氮素淋失率较高。配施保水剂可

明显降低施用有机肥的氮素淋溶淋失率,与 T1 处理相比,T2、T3、T4 硝态氮淋失率分别降低了 78.46%, 35.49%, 53.97%, 全氮损失率分别降低了 71.85%, 35.53%, 41.56%, 其中有机肥配施保水剂 PAM 处理硝态氮和全氮累计淋失率最低。

3 讨论

3.1 有机肥配施保水剂具有显著的保水效果

施用有机肥可有效改善土壤结构,提高土壤的保水蓄水性能,增加土壤储水量,达到调节土壤水肥供应,提高作物产量的效果。保水剂多为高分子聚合物,如聚丙烯酰胺(PAM)、沃特保水剂(烯酸或丙烯酸酰胺与凹凸棒土合成的有机-无机复合保水剂)、SAP(高吸水树脂),吸水膨胀成为水凝胶,具有吸收比自身重几百倍水的高吸水性能,保水性能优良。土壤中施用保水剂能显著增强土壤的持水能力^[15],提高土壤的含水量^[16]。有机肥和保水剂配施能有效提高土壤含水量^[17],改善土壤结构,较施用有机肥或保水剂的效果更好。本研究表明,单施有机肥和有机肥配施保水剂均对土壤湿润锋运移深度、入渗速率和淋溶液体体积 3 个土壤水分入渗的特征量有不同程度的抑制。入渗终止时,土壤淋溶液体体积、湿润锋运移深度和入渗速率较对照分别降低了 33.33%~46.49%, 22.73%~31.82%, 1.25%~6.78%, 说明单施有机肥或有机肥配施保水剂均可有效降低水分在土壤中的运移速度和水分入渗的深度,使水分能长时间保持在浅层土壤,有利于作物根系吸收利用,达到增加土壤中保持的水分总量,显著增强蓄水能力的效果。其中有机肥配施 PAM 处理的淋溶液体体积最小,在土壤中湿润锋运移速度最慢,说明其有利于增强土壤入渗,减少地表径流,延长水分在土壤中停留时间,提高土壤持水能力。这可能是由于施用有机肥的土壤具有高孔隙度和低容重的特性,导水性和缓冲性较好^[18]; 有机肥的主要成分腐殖质是能有效吸附水分的高分子聚合物,可作为土壤的良好胶结剂^[19],而保水剂具有吸水作用,可吸收自身重量上百倍的水分,在土壤中通过吸水形成凝胶状态,堵塞土壤大空隙,减少水分淋溶损失,增强土壤的保水性,因此,两者配施的保水效果优于单施有机肥。

3.2 有机肥配施保水剂降低土壤氮素淋溶损失

淋溶作用是土壤中氮素养分损失的主要途径之一,同时也是环境水体污染的重要途径^[20]。旱地土壤常发生硝化作用,硝态氮难以被土壤吸附,遇降水或灌溉极易发生淋失。盖霞普等^[21]研究发现,施用有机肥可提高土壤氮素固持能力,降低氮素损失

风险。有机肥通过促进土壤对化肥氮的固定,可减少施肥后短期内氮素的流失,提高氮素利用率^[22]。但也有研究^[7]表明,有机肥在短期内可减少硝态氮淋溶损失,长期施用后会与化学氮肥一样导致大量硝态氮淋溶损失。本试验中,第 1 次淋溶后各处理淋溶液中硝态氮含量与对照相比降低了 16.31%~78.17%;此后施用有机肥处理淋溶液中氮素含量和氮素损失率均明显高于对照。这主要是由于有机肥自身携带有有机氮素养分,且具有持久释放养分的能力,有良好的渐进性和持续性^[23]。随着淋洗数次的增加,有机肥释放出的无机氮素也被淋洗出土壤,导致氮素损失。保水剂施入土壤能显著减少氮素淋溶损失^[24],有机肥配施保水剂可降低有机肥中氮素的淋溶损失,具有长期保肥效果。与施用有机肥处理相比,有机肥配施保水剂处理的硝态氮淋失率、全氮淋失率分别降低了 35.49%~78.46%, 35.53%~71.85%, 可见,有机肥配施保水剂是降低养分淋溶损失的有效措施。有机肥配施保水剂在改善土壤理化性质方面总体表现优于单施有机肥,这主要是由于有机肥中腐殖质可吸附可溶性养分,保水剂可通过吸水减少淋溶降低养分损失,同时通过静电引力、范德华力、离子交换、螯合等机制固定进入到分子内部的养分离子或分子,延缓养分的释放^[25]。从配施保水剂种类看,本试验条件下有机肥配施 PAM 处理的硝态氮和全氮淋溶损失率均最低,对紫色土壤保水保肥效果最好。这可能是由于 PAM 分子链电荷密度大,黏结吸附作用强,且水解度大,分子链互斥作用强,使分子链卷曲程度降低,堵塞土壤空隙作用强;同时 PAM 具有增加紫色黏土土壤团聚体数量和结构稳定性的作用^[16],在紫色黏土上可充分发挥其保水保肥作用。

4 结论

有机肥配施保水剂可有效增加土壤的保水保肥能力,是控制土壤水分和养分淋失的有效措施。单施有机肥和有机肥配施保水剂均降低了湿润锋运移深度和入渗速率。与对照相比,单施有机肥和有机肥配施保水剂处理的湿润锋运移深度降低了 33.33%~46.49%,入渗速率降低了 22.73%~31.82%,累计淋溶液体体积降低了 1.25%~6.78%。施用有机肥有一定增肥保肥能力,但随淋洗次数增加保肥能力逐渐降低,与对照相比,在持续淋溶条件下单施有机肥的硝态氮和全氮累计损失率分别升高了 12.00%, 17.51%。有机肥配施保水剂可有效减少氮素淋失量,降低氮素淋失率,提高土壤保肥能力。与施用有机肥相比,有机肥配施保水剂硝态氮淋失率降低了 35.49%~

78.46%, 全氮淋失率降低了 35.53%~71.85%, 其中有机肥配施 PAM 处理保水保肥效果最好。

参考文献:

- [1] 柴冠群, 赵亚南, 黄兴成, 等. 不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 296-302, 309.
- [2] 孙丽丽, 查轩, 黄少燕, 等. 不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 21-26.
- [3] 崔红艳, 许维成, 孙毓民, 等. 施用有机肥对土壤水分、胡麻产量和品质的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 307-312.
- [4] Benbi D K, Sekhon B S. Soil test based fertilizer calibrations in pressmud amended rice-wheat sequence in alluvial soils of India [J]. *Ecology, Environment and Conservation*, 2014, 20(4): 1937-1943.
- [5] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 19-26.
- [6] 马征, 姚海燕, 张柏松, 等. 保水剂对粘质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 221-226.
- [7] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2336-2347.
- [8] 郭世文, 李品芳, 芦谅, 等. 不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 1-11.
- [9] 冯瑞云, 王慧杰, 郭峰, 等. 秸秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(9): 44-48, 65.
- [10] 徐军. 秸秆-膨润土-PAM 对土壤肥力及作物产量的调控效应[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [11] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 144-149.
- [12] 付晨星, 魏占民, 王晓宇, 等. PAM 与 SAP 交并施用对一维水分垂直入渗特性的影响[J]. 节水灌溉, 2016(9): 102-106.
- [13] 国家环境保护局. HJ 636-2012 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 40-42.
- [14] 李卓瑞, 韦高玲. 不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 333-338.
- [15] 张富仓, 李继成, 雷艳, 等. 保水剂对土壤保水持肥特性的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 120-128.
- [16] 于健, 雷廷武, Isaac S, 等. PAM 特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 21-27.
- [17] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations [J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(1): 75-85.
- [18] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 352-360.
- [19] Lee J. Effect of application methods of organic fertilizer on growth, soil chemical properties and microbial densities in organic bulb onion production [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(3): 299-305.
- [20] 靖彦, 陈效民, 李秋霞, 等. 生物质炭对红壤中硝态氮和铵态氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 265-269.
- [21] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 310-318.
- [22] Celik I, Gunal H, Budak M, et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions [J]. *Geoderma*, 2010, 160(2): 236-243.
- [23] 马忠明, 王平, 陈娟, 等. 适量有机肥与氮肥配施方可提高河西绿洲土壤肥力及作物生产效益[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1298-1309.
- [24] 苟春林, 王新爱, 李永胜, 等. 保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 4015-4021.
- [25] 姚建武, 王艳红, 唐明灯, 等. 施用保水剂对旱地赤红壤持水能力及氮肥淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 191-194.