

磷肥品种与土壤磷素活化系数对栗钙土磷素淋溶的影响

秦永林¹, 田艳花¹, 陈杨², 贾立国¹, 于静¹, 樊明寿^{1*}

(1.内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019;

2.内蒙古农业大学 草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011)

摘要:【目的】探究磷肥品种与土壤磷素活化系数(PAC)对栗钙土磷素淋溶的影响。【方法】采集栗钙土农田 2 种 PAC 差异较大的土壤, 采用土柱模拟试验, 研究了施用含 P_2O_5 为 160 kg/hm^2 的过磷酸钙(MCP)、磷酸一铵(MAP)、磷酸二铵(DAP)对土壤渗漏液的总磷(TP)、可溶性磷(TDP)动态变化以及淋失量的影响。【结果】栗钙土中存在超过 40 cm 土层的磷肥淋溶损失, PAC 为 7.72% 的土壤淋溶液初始 TP 质量分数是 PAC 为 0.86% 的土壤的 1.91 倍; TDP 是栗钙土磷淋溶的主要形式, 占 TP 的 68.8%~82.9%; PAC 较高的土壤施用磷肥显著增加磷素淋溶损失, 且磷素淋溶损失量显著高于 PAC 较低的土壤; PAC 较高的土壤中 DAP 的磷肥淋溶损失显著高于 MAP 和 MCP 处理, 各磷肥淋溶量不足施磷量的 2%。【结论】PAC 较高的土壤施用磷肥存在较高的磷淋溶风险, DAP 处理在栗钙土中的磷素淋溶损失最大。

关键词: 磷肥; 淋溶损失; 栗钙土; 土壤磷素活化系数

中图分类号: S274; S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019410

秦永林, 田艳花, 陈杨, 等. 磷肥品种与土壤磷素活化系数对栗钙土磷素淋溶的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 138-144.

QIN Yonglin, TIAN Yanhua, CHEN Yang, et al. The Combined Effects of Phosphorus Fertilizers Types and Activation Coefficient of Soil Phosphorous on Phosphorous Leaching from Chestnut Soil [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 138-144.

0 引言

【研究意义】减少磷淋溶损失不仅是农业生产当中减磷增效关注的焦点, 而且对降低水体的污染具有重要意义^[1-5]。农田土壤磷素的淋溶直接受磷肥施用、灌水以及土壤特性影响, 探明特定土壤类型下不同磷肥品种的磷素淋溶特性, 对制定农业生产的磷肥高效利用以及减少因磷素淋溶影响周围水体的策略具有科学指导意义^[6-10]。【研究进展】早在 1939 年, Pearson 等^[11]利用土壤剖面研究了磷素的纵向移动, 之后 Cooke 等^[12]在排水中证明了土壤磷的淋溶。农业生产中普遍应用的化学磷肥品种有: 过磷酸钙、钙镁磷肥及磷铵等, 这些磷肥品种在不同土壤类型上的磷素淋溶研究并不系统, 仅在部分土壤类型上有报道。如在土壤速效磷(Olsen 法)为 72.3 mg/kg 的菜园土(pH

值为 5.41)上, 相同施磷量下磷肥淋溶损失量表现为磷铵>过磷酸钙>钙镁磷肥^[9];而在土壤速效磷(Olsen 法)为 20.95 mg/kg 的河潮土(pH 值为 5.53)上, 相同施磷量下钙镁磷肥的磷流失风险大于过磷酸钙^[10]。针对栗钙土上不同磷肥品种磷素的淋溶未见报道。

【切入点】栗钙土约占内蒙古土地总面积的 21.3%, 大约 243.4 万 hm^2 , 主要分布在阴山丘陵农区, 是典型的石灰性土壤。施入农田的磷肥受石灰性土壤吸附作用影响, 极大地降低了磷素在土壤中的移动, 但长年施用磷肥, 部分农田的土壤速效磷显著提高, 土壤磷活化系数(PAC)也发生了变化, 土壤中的高能吸附位点可能大部分被占据, 降低了土壤对磷肥的固定^[13-15], 栗钙土农田 60 cm 耕层以下磷肥的淋溶强度仍有待于调查。以往研究多关注作物磷肥合理用量的研究, 缺乏磷肥品种与特定土壤类型匹配的指导, 因此, 研究不同磷肥品种及 PAC 对栗钙土磷淋溶的影响对于该地区具有重要的现实意义。【拟解决的关键问题】利用土柱模拟灌溉马铃薯用水量(灌水量+生育期有效降雨量)的方法研究磷素的淋溶, 目的是验证栗钙土中是否存在磷淋溶, 明确磷肥品种与 PAC 对栗钙土磷素淋溶影响的特点。

收稿日期: 2019-12-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200, 2018YFD0200801); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT-20-B16); 内蒙古自然科学基金项目(2019MS03048)

作者简介: 秦永林(1985-), 男, 内蒙古清水河人。实验师, 博士, 主要从事植物水分与养分高效利用方面的研究。E-mail: imauqyl@163.com

通信作者: 樊明寿(1965-), 男, 内蒙古四子王旗人。教授, 博士, 主要从事植物营养生理的教学与研究。E-mail: fmswh@126.com

1 材料与方法

1.1 供试土壤概况

分别采集土壤磷活化系数（0.86%）较低的土壤（PAC-L）（呼和浩特内蒙古农业大学农场马铃薯试验地）与土壤磷活化系数（7.72%）较高的土壤（PAC-H）

（四子王旗东八号村马铃薯农田）。土壤风干后过 2 mm 筛备用，2 种土壤均属于栗钙土，均为砂质壤土，土壤 0~20 cm 的颗粒组成及土壤理化性质如表 1、表 2 所示。其中 PAC-L 土壤平均田间最大持水率为 19.3%，PAC-H 土壤为 22.8%。

表 1 供试土壤的颗粒组成

Table1 Particle compositions of the tested soils						%
供试土壤 Tested soils	>2 mm	2~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm
PAC-L	5.53	70.21	9.43	5.67	3.78	5.37
PAC-H	6.48	71.37	3.74	5.61	3.74	9.05

表 2 供试土壤的理化性质

Table 2 Situation of soil physical and chemical properties of test area							
供试土壤 Tested soils	pH 值	有机质/(g kg ⁻¹)	总氮/(g kg ⁻¹)	总磷/(g kg ⁻¹)	速效磷/(mg kg ⁻¹)	速效钾/(mg kg ⁻¹)	体积质量/(g cm ⁻³)
PAC-L	8.34	22.5	1.04	0.73	6.3	148	1.10
PAC-H	7.83	13.8	0.87	0.29	22.4	101	1.30

1.2 试验设计

2 种土壤（PAC-L、PAC-H）均设置不施磷肥（CK）、过磷酸钙（MCP）、磷酸一铵（MAP）、磷酸二铵（DAP）4 个处理，供试磷肥的基本性质如表 3 所示。磷肥用量为 P₂O₅ 160 kg/hm²（依据内蒙古马铃薯磷肥推荐用量），对应 MCP 为 1000 kg/hm²、MAP 为 262 kg/hm²、DAP 为 348 kg/hm²。为消除磷酸一铵和磷酸二铵所携带氮素的影响，以尿素（N 46%）补充等量的氮素，每个处理重复 5 次。各处理淋溶水量为 4 285 m³/hm²，依据阴山北麓马铃薯灌水调查平均值（2 475 m³/hm²）与 2009—2018 年该地区马铃薯生育期平均有效降雨量（181 mm）总和而定，淋溶次数模拟该地区灌溉马铃薯调查平均滴灌次数。

表 3 供试磷肥的基本性质

Table3 Properties of phosphate fertilizer		
肥料种类 Fertilizer types	饱和溶液 pH 值 pH of saturated solution	溶解度/g Solubility
MCP	2.38	14.42
MAP	4.35	23.45
DAP	8.16	52.88

1.3 试验装置

供试土柱采用白色 PVC 管，高 70 cm（60 cm 模拟土层），内径 7.5 cm，横截面积为 44.16 cm²。①先用 100 目的尼龙网铺到 PVC 管底部，尼龙网上铺大约 3 cm 厚的石英砂以防止土壤渗漏，然后 PVC 管内壁均匀涂抹凡士林，防止灌溉喷水未经土壤渗漏而沿内壁直接流入淋溶液收集器；②分别按原土壤体积质量计算风干过 2 mm 筛的供试土壤，装入 PVC 管，先装入 40~60、20~40 cm 对应的土层，表层 0~20 cm 土壤每桶磷肥用量（P₂O₅）为 0.070 7 g，均匀混合后

装入；③土柱土层表面铺上少许沙子以及 2 层无磷滤纸，以防止加水时出现柱状流和优先流等；④PVC 管装入专用木架以固定，用蒸馏水浇至土柱含水率达到田间持水率后培养 1 个月以上；⑤淋溶试验时，先喷洒蒸馏水，使 0~60 cm 土壤达到田间持水率（依据不同土层的最大田间持水率计算喷水量）。然后缓慢加水 200 mL，收集渗漏液，按此步骤每隔 7 d 进行 1 次，共进行 8 次淋溶。收集全部滤液，待无明显渗漏后（24 h 以后），取烧杯测淋溶液体积，并将收集好的渗漏液带回实验室检测。

1.4 测定项目与方法

土壤速效磷：0.5 mol/L 碳酸氢钠振荡浸提，钼锑抗比色测定；土壤全磷：氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法；水样总磷：过硫酸钾-钼酸铵分光光度法；溶解态磷：经 0.45 μm 滤膜后过滤后采用过硫酸钾-钼酸铵分光光度法；颗粒态磷（TPP）= TP-TDP；磷肥损失率（%）=（施磷处理的磷素损失量-CK 的磷素损失量）/施磷量×100%；土壤磷活化系数（PAC）（%）= 土壤速效磷量/土壤全磷×100%。

1.5 数据处理

数据采用 SPSS 24.0 和 Excel 软件统计分析，采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

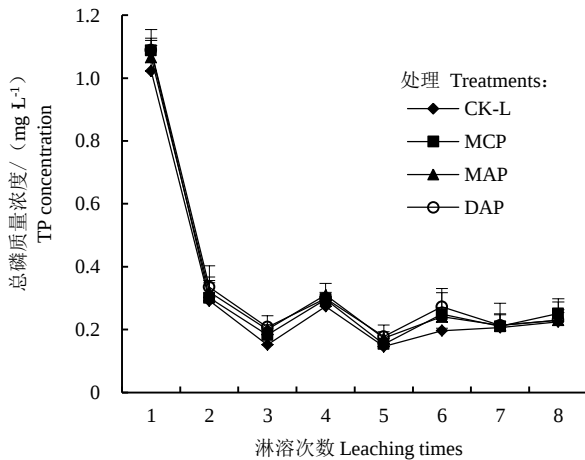
2.1 不同种类磷肥对土壤磷素淋溶中 TP 与 TDP 质量浓度的影响

图 1 为不同土壤磷活化系数土壤中不同种类磷肥的淋溶液中总磷质量浓度的变化情况。由图 1 可知，PAC-L 土壤 TP 质量浓度随着淋溶次数的增加呈先下降后平稳的趋势，PAC-L 土壤淋溶液 TP 质量浓度整

体低于 PAC-H 土壤。PAC-L 土壤的所有施肥处理及 CK-L 在第 1 次与第 2 次淋溶之间 TP 质量浓度下降幅度较大, 下降幅度基本超过 70%, 而后的几次淋溶都呈渐趋平稳, 基本维持在 0.15~0.30 mg/L。

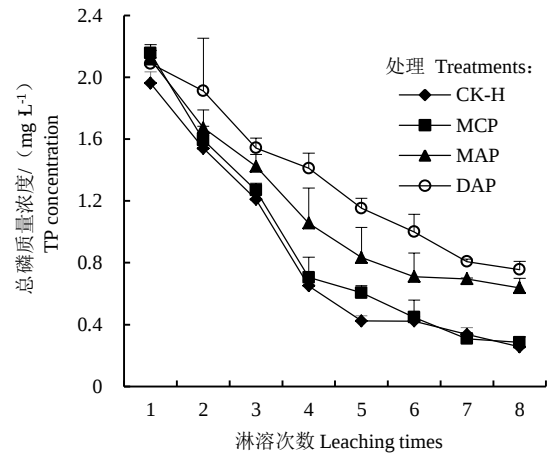
PAC-H 土壤淋溶液 TP 质量浓度随淋溶次数的增加呈先缓慢下降后平稳的趋势, 前 4 次淋溶期间, PAC-H 土壤淋溶液 TP 质量浓度下降幅度较大, 第 5~8 次淋溶中, 3 种磷肥土壤淋溶液中 TP 质量浓度表现为: 磷酸二铵>磷酸一铵>过磷酸钙, 第 8 次淋溶时, 磷酸二铵 TP 质量浓度分别是磷酸一铵的 1.16 倍、过磷酸钙的 2.65 倍、CK-H 的 2.95 倍。

图 2 不同土壤磷活化系数土壤中不同种类磷肥



(a) PAC-L 土壤 Soil of PAC-L

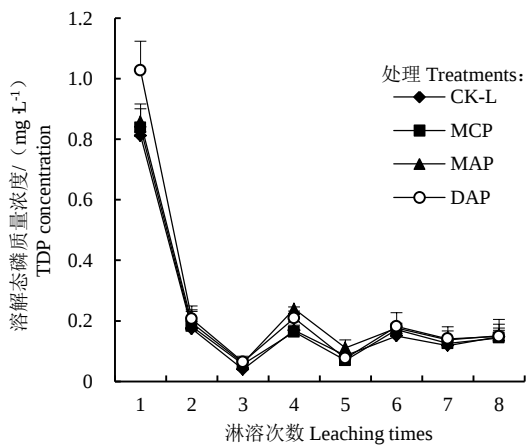
的淋溶液中溶解态磷浓度的变化情况。由图 2 可知, TDP 质量浓度为与 TP 质量浓度随淋溶次数的增加其变化趋势相似。PAC-L 土壤淋溶液 TDP 质量浓度整体都低于 PAC-H 土壤。PAC-L 土壤的 4 种处理在第 1 次与第 2 次淋溶之间 TDP 质量浓度下降幅度较大, 而后几次淋溶都基本维持在 0.11~0.23 mg/L 之间, CK-L 及 3 种磷肥种类间的 TDP 质量浓度无差异。第 5~8 次淋溶中, PAC-H 土壤中 3 种磷肥土壤淋溶液中 TP 质量浓度表现为: 磷酸二铵>磷酸一铵>过磷酸钙, 第 8 次淋溶时, 磷酸二铵 TP 质量浓度分别是磷酸一铵的 1.81 倍、过磷酸钙的 4.49 倍、CK-H 的 7.52 倍。



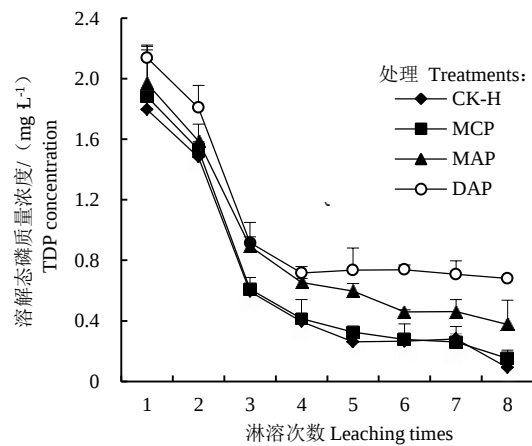
(b) PAC-H 土壤 Soil of PAC-H

图 1 不同土壤磷活化系数土壤中不同种类磷肥的淋溶液中总磷质量浓度变化

Fig.1 Dynamics of soil TP leaching concentration under different phosphorous fertilizers and soils of PAC



(a) PAC-L 土壤 Soil of PAC-L



(b) PAC-H 土壤 Soil of PAC-H

图 2 不同土壤磷活化系数土壤中不同种类磷肥的淋溶液中溶解态磷质量浓度变化

Fig.2 Dynamics of soil TDP leaching concentration under different phosphorous fertilizers and soils of PAC

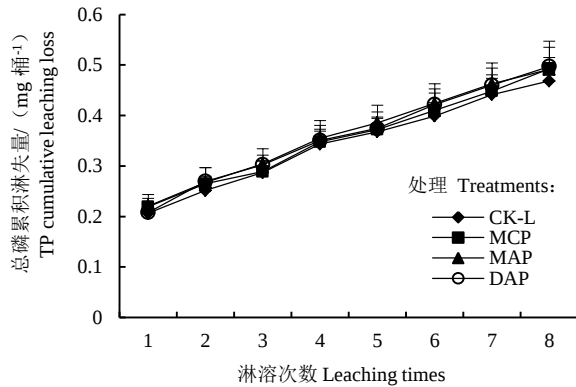
2.2 不同种类磷肥对土壤磷素累积淋失量的影响

图 3 为不同土壤磷活化系数土壤中不同种类磷肥的淋溶液中总磷累积淋失量。由图 3 可知, 不同处理间的 TP 累积淋失量均随淋溶次数呈上升趋势。8 次淋溶过程中, PAC-L 土壤淋溶液 TP 累积淋失量低于 PAC-H 土壤, PAC-L 土壤中 4 种处理的 TP 累积淋

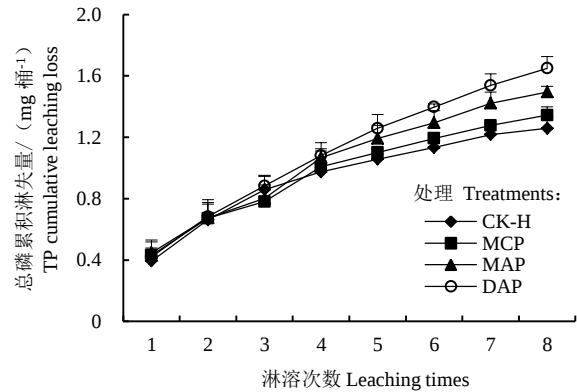
失量无差异。在前 4 次淋溶过程中, PAC-H 土壤 4 种处理无差异, 第 5 次开始, 磷酸一铵和磷酸二铵的 TP 淋失量高于 CK-H, 3 个磷肥种类之间 TP 累积淋失量表现为: 磷酸二铵>磷酸一铵>过磷酸钙。第 8 次淋溶时, 磷酸二铵 TP 累积淋失量分别是磷酸一铵的 1.10 倍、过磷酸钙的 1.23 倍、CK-H 的 1.31 倍。

图 4 为不同土壤磷活化系数土壤中不同磷肥种类的淋溶液中溶解态磷累积淋失量。由图 4 可知, 不同种类磷肥对土壤 TDP 累积淋失量变化趋势与 TP 累积淋

失量基本相同。第 8 次淋溶时, 磷酸二铵 TDP 累积淋失量分别是磷酸一铵的 1.14 倍、过磷酸钙的 1.42 倍、CK-H 的 1.53 倍。



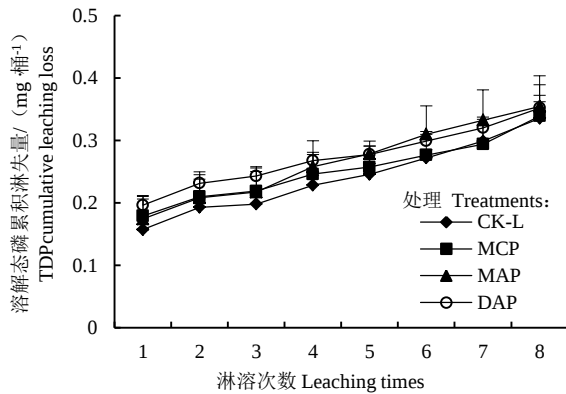
(a) PAC-L 土壤 Soil of PAC-L



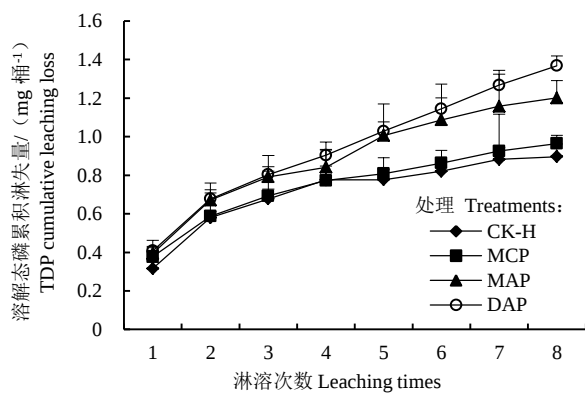
(b) PAC-H 土壤 Soil of PAC-H

图 3 不同土壤磷活化系数土壤中不同种类磷肥的淋溶液中总磷累积淋失量

Fig.3 Leaching loss of soil TP under different phosphorous fertilizers and soils of PAC



(a) PAC-L 土壤 Soil of PAC-L



(b) PAC-H 土壤 Soil of PAC-H

图 4 不同土壤磷活化系数土壤中不同磷肥种类的淋溶液中溶解态磷累积淋失量

Fig.4 Leaching loss of soil TDP under different phosphorous fertilizers and soils of PAC

2.3 不同种类磷肥对土壤淋溶液中不同形态磷比例的影响

表 4 为不同种类磷肥土壤淋溶液中 TDP、TPP 占总磷比例。

表 4 土壤淋溶液中各形态所占的比例

Table 4 Proportions of different forms of P in TP of leaching

处理 Treatments	(TDP/TP) /%	(TPP/TP) /%	
PAC-L	CK-L	71.20±1.78a	28.80±1.78a
	过磷酸钙	68.78±1.52a	31.22±1.52a
	磷酸一铵	72.17±2.27a	27.83±2.27a
	磷酸二铵	70.76±2.02a	29.24±2.02a
PAC-H	CK-H	71.59±1.79b	28.41±1.79a
	过磷酸钙	71.80±1.94b	28.20±1.94a
	磷酸一铵	80.34±2.41a	19.66±2.41b
	磷酸二铵	82.91±2.82a	17.09±2.82b

注 相同土壤磷素活化系数下列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平, 下同。

Note Date denoted by different small letters in same PAC are different significantly at the 0.05 level, respectively. The same as blew

由表 4 可知, PAC-L 土壤 3 种磷肥与 CK 的 TDP/TP、TPP/TP 没有差异; PAC-H 土壤中, 磷酸二铵和磷酸一铵的 TDP/TP 显著高于过磷酸钙、CK-H, 过磷酸钙与 CK-H 差异不显著。总体来看, PAC-H 土壤的 TDP/TP 高于 PAC-L 土壤, TDP 占 TP 的 68% 以上, 是土壤磷淋溶的主要形态。

2.4 不同种类磷肥对土壤淋溶损失的影响

由表 5 可知, PAC-H 土壤中过磷酸钙、磷酸一铵、磷酸二铵的 TP、TDP 淋失量分别比 CK 增加了 6.32%、18.25%、31.23% 和 7.8%、33.33%、51.96%。PAC-L 土壤 3 种磷肥的损失率没有明显差异, 且均没有超过 0.1%。PAC-H 土壤的 3 种磷肥损失率差异显著, 其大小依次为: 磷酸二铵 > 磷酸一铵 > 过磷酸钙。总体来看, PAC-H 土壤的磷肥损失率显著高于 PAC-L 土壤。

表 5 不同磷肥种类在土壤中的磷淋失与磷肥损失率
Table 5 Leaching loss of soil TP, TDP, TPP and fertilizer
leaching loss under different phosphorous fertilizers

处理 Treatments		磷淋失量 Leaching loss of P/ (kg hm ⁻²)			磷肥损失率 Loss rate of P fertilizer/%
		TP	TDP	TPP	
PAC-L	CK-L	1.06±0.02a	0.77±0.01a	0.29±0.02a	/
	过磷酸钙	1.11±0.04a	0.77±0.01a	0.34±0.03a	0.06±0.04a
	磷酸一铵	1.11±0.04a	0.79±0.02a	0.32±0.03a	0.06±0.04a
	磷酸二铵	1.13±0.05a	0.79±0.02a	0.34±0.03a	0.10±0.05a
PAC-H	CK-H	2.85±0.06d	2.04±0.07c	0.81±0.05a	/
	过磷酸钙	3.03±0.07c	2.20±0.09c	0.83±0.06a	0.26±0.07c
	磷酸一铵	3.37±0.08b	2.72±0.11b	0.65±0.06b	0.75±0.08b
	磷酸二铵	3.74±0.13a	3.10±0.12a	0.64±0.07b	1.26±0.13a

3 讨论

3.1 磷肥品种与 PAC 对栗钙土磷素淋溶质量浓度与形态的影响

磷素淋溶受到多种因素的影响,包括土壤类型、磷肥种类和用量、土壤理化性质、灌溉和降水等。本试验研究了在 2 种不同 PAC 的栗钙土中,3 种磷肥施入土壤后的磷素淋溶情况。PAC 对土壤淋溶液中 TP、TDP 质量浓度有极显著影响,PAC 越高,意味着土壤中更多吸附磷的位点被占据,降低了土壤对施入磷肥的吸附与固定能力,增加了土壤磷素淋溶损失的风险。如在潮褐土(pH 值为 7.8)上,PAC 为 14.57%土壤的最大吸磷量是 PAC 为 3.15%土壤的 0.49 倍^[15]。此外,PAC 低的土壤,3 种磷肥对土壤磷素淋溶没有明显影响,而 PAC 高的土壤中,3 种磷肥种类在淋溶中后期对 TP、TDP 质量浓度都有显著影响,说明磷肥品种对土壤磷素淋溶的影响存在阶段性。造成以上结果的可能原因是磷肥随水分向下运移过程中,被土壤吸附固定,而只有当土壤对磷达到最大吸附饱和时,剩余的磷肥才会随着水分的运动向下运移,由于 PAC 低的土壤吸附能力较强,因此导致差异性不明显,而 PAC 高的土壤与之相反。多数研究认为土壤磷素淋溶流失的形态主要是 TDP,如塿土^[16]、潮土^[17]等;也有少部分研究发现水稻土中土壤磷素淋溶流失的主要形态是 TPP^[17]。本试验中,从淋溶质量浓度变化趋势以及不同形态磷占总磷的比例均说明了 TDP 是栗钙土磷素淋溶的主要形态。

3.2 磷肥品种与 PAC 对栗钙土磷素淋溶损失的影响

理论上酸性肥料(过磷酸钙、磷酸一铵)可中和栗钙土(pH 值为 7.83)的碱性,提高土壤有效磷量而增加磷素的淋溶,而磷酸二铵的溶解度>磷酸一铵

>过磷酸钙,最终 PAC-H 土壤上经过 8 次淋溶后 3 种磷肥的损失率大小依次为:磷酸二铵>磷酸一铵>过磷酸钙,这可能是磷肥本身的 pH 值与溶解度共同作用的结果。本试验中,各处理的 PAC-H 土壤 TP 损失量是 PAC-L 土壤的 2.68~3.31 倍,其原因包括:① PAC-H 土壤大于 0.05 mm 土壤颗粒的比例较高,黏粒含量低,没有被土壤吸附的磷更容易随着水分运动淋溶土壤下层^[18];②土壤的 PAC 为 7.72%,远高于 2%的临界线,土壤全磷易转化为速效磷,即土壤自身磷水平也是土壤磷素淋溶损失的主要来源^[19];③PAC-H 土壤的 pH 值(7.83)略低于 PAC-L 土壤 pH 值(8.34),有利于土壤磷素活性的提高^[20]。

由表 5 可知,3 种肥料依次为经过 8 次淋溶后磷肥的累积损失率在 0.06%~1.26%,属于正常磷肥损失淋溶范围^[21],虽然研究磷肥损失的农学意义已经没有任何实际经济价值,但是其淋溶所造成的环境风险却不容忽视。Vander 等^[22]认为环境所能承受的磷素流失量为 0.44 kg/(hm² a),而本文在栗钙土上的试验显示,即使低磷水平土壤对照处理磷素的淋溶量也是其的 2 倍多,为 1.06 kg/hm²。因此,栗钙土农田土壤磷的环境风险不容乐观,当然本试验只是在土柱模拟情况下,只能作为一个参考,在田间尺度需进一步的研究。

4 结论

1) 栗钙土中存在超过 40 cm 土层的磷肥淋溶损失,PAC 为 7.72%土壤淋溶液的初始 TP 质量浓度是 PAC 为 0.86%土壤的 1.91 倍;TDP 是栗钙土磷淋溶的主要形式,占 TP 的 68.8%~82.9%。

2) 与 PAC 为 0.86%土壤相比,PAC 为 7.72%土壤施用 MCP、MAP 及 DAP 分别增加磷肥淋溶损失 3.60 倍、10.40 倍、12.71 倍。

3) 栗钙土中各磷肥淋溶量不足施磷量的 2%。

参考文献:

- [1] EGHBALL B, BINFORD G D, BALLTENSBERGER D D. Phosphorus movement and adsorption in a soil receiving long-term manure and fertilizer application[J]. Journal of Environmental Quality, 1996, 25(6): 1 339-1 343.
 - [2] SIDDIQUE M T, ROBINSON J S. Phosphorus sorption and availability in soils amended with animal manures and sewage sludge[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(3):1 114-1 121.
 - [3] 赵春晓,魏淑贞,郜翻身,等.不同材料对河套灌区土壤磷素淋溶分布的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(11):63-68.
- ZHAO Chunxiao, WEI Shuzhen, GAO Fanshen, et al. Impact of soil amended with different materials on phosphorus leaching in Hetao

- irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(11): 63-68.
- [4] PIZZEGHELLO D, BERTI A, NARDI S, et al. Phosphorus-related properties in the profiles of three Italian soils after long-term mineral and manure applications[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 189: 216-228.
- [5] 杨继伟, 汤广民, 李如忠, 等. 受淹农田土壤-上覆水氮磷迁移特征模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(12): 71-77.
- YANG Jiwei, TANG Guangmin, LI Ruzhong, et al. Loss of nitrogen and phosphorus from soil and surface water in flooded cropland[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 71-77.
- [6] VANDEN NT, RUYSSCHAERT G, VANDECASTEELE B, et al. The long term use of farmyard manure and compost: Effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 23-33.
- [7] 刘汝亮, 王芳, 王开军, 等. 不同类型肥料对东北地区稻田氮磷损失和水稻产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(10): 63-68.
- LIU Ruliang, WANG Fang, WANG Kaijun, et al. Effects of fertilizers on nitrogen and phosphorus leaching and yield of rice in northeast China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(10): 63-68.
- [8] 刘汝亮, 王芳, 张爱平, 等. 引黄灌区不同肥料类型和施肥技术对稻田氮磷流失的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(9): 46-49.
- LIU Ruliang, WANG Fang, ZHANG Aiping, et al. Types of fertilizers and their application affect the leaching of nitrogen and phosphorus in paddy fields in irrigation districts of Yellow River[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(9): 46-49.
- [9] 庄远红, 吴一群, 李延. 不同种类磷肥施用对蔬菜地磷素淋失的影响研究[J]. *漳州师范学院学报(自然科学版)*, 2009, 22(1): 97-100.
- ZHUANG Yuanhong, WU Yiqun, LI Yan. Effects of different phosphate fertilizers application on phosphorus leaching in vegetable soils[J]. *Journal of Zhangzhou Normal University(Natural Science)*, 2009, 22(1): 97-100.
- [10] 龚蓉, 刘强, 荣湘民, 等. 中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 106-110.
- GONG Rong, LIU Qiang, RONG Xiangmin, et al. Effects of phosphorus fertilizer reduction on the leaching of different forms of phosphorus nutrients in the Hilly Upland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 106-110.
- [11] PEARSON R W, SIMONSON R W. Organic phosphorus in seven Iowa soil profiles: distribution and amounts as compared to organic carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1940 (4): 162-167.
- [12] COOKE G, WILLIAMS R J B. Significance of man-made sources of phosphorus: fertilizers and farming: the phosphorus involved in agricultural systems and possibilities of its movement into natural water[J]. *Progress in Water Technology*, 1973 (2): 19-33.
- [13] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 132-141.
- HUANG Jing, ZHANG Yangzhu, XU Minggang, et al. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to soil phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under long-term and its fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 132-141.
- [14] 王琼, 展晓莹, 张淑香, 等. 长期有机无机肥配施提高黑土磷含量和活化系数[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 679-688.
- WANG Qiong, ZHAN Xiaoying, ZHANG Shuxiang, et al. Increment of soil phosphorus pool and activation coefficient through long-term combination of NPK fertilizers with manures in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 679-688.
- [15] 张海涛, 刘建玲, 廖文华, 等. 磷肥和有机肥对不同磷水平土壤磷吸附-解吸的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 284-290.
- ZHANG Haitao, LIU Jianling, LIAO Wenhua, et al. Effect of phosphate fertilizer and manure on properties of phosphorus sorption and desorption in soils with different phosphorus levels[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(2): 284-290.
- [16] 项大力, 杨学云, 孙本华, 等. 土壤深度对壤土磷素淋失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 439-447.
- XIANG Dali, YANG Xueyun, SUN Benhua, et al. Impacts of soil depths on phosphorus leaching losses in manural loessial soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(6): 439-447.
- [17] 刘娟, 包立, 张乃明, 等. 我国4种土壤磷素淋溶流失特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 64-70.
- LIU Juan, BAO Li, ZHANG Naiming, et al. Characteristics of phosphorus leaching losses in four soils in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 64-70.
- [18] 吕家珑, FORTUNE S, BROOKES P C. 土壤磷淋溶状况及其Olsen磷“突变点”研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(2): 142-146.
- LYU Jialong, FORTUNE S, BROOKES P C. Research on phosphorus leaching from soil and its Olsen-P “Shreshold Volume”[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2): 142-146.
- [19] 李学平, 石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(2): 434-439.
- LI Xueping, SHI Xiaojun. Dynamic characteristics of phosphorus in purple paddy soil and its environmental impact[J]. *Environment Science*, 2008, 29(2): 434-439.
- [20] 王静, 丁树文, 李朝霞, 等. 丹江库区典型土壤磷的淋溶模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 692-697.
- WANG Jing, DING Shuwen, LI Zhaoxia, et al. Simulated study on phosphorus leaching of typical soils in Danjiang reservoir area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 692-697.
- [21] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983: 207-211.
- ZHU Zuxiang. *Soil Science*[M]. Beijing: Agriculture Press, 1983, 207-211.
- [22] VANDER MOLEN D T, BREEUWSMA A, BOERS P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: impact, strategies, and perspectives[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(1): 4-11.

The Combined Effects of Phosphorus Fertilizers Types and Activation Coefficient of Soil Phosphorous on Phosphorous Leaching from Chestnut Soil

QIN Yonglin¹, TIAN Yanhua¹, CHEN Yang², JIA Ligu¹, YU Jing¹, FAN Mingshou^{1*}

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China;

2. College of Grassland and Resource Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China)

Abstract: 【Background】 Alleviating phosphorus leaching from soil not only reduces fertilizers waste in agricultural production but also ameliorates its detrimental impact on environment. Phosphorus leaching from farmland is affected by a multitude of abiotic and biotic factors, and understanding the combined effect of phosphorus fertilizer types and soil texture is important to develop efficient fertilizer use strategies to reduce phosphorus loss in agricultural production. 【Objective】 The purpose of this paper is to experimentally study phosphorous leaching from a chestnut soil as impacted by different phosphorous fertilizers applied to soil with contrasting phosphorus activation coefficient (*PAC*). 【Method】 The experiment was conducted in columns packed with two types of soils with different phosphorus activation coefficient. The fertilizers used in the experiment were monocalcium phosphate (MCP, P_2O_5 160 kg/hm²), monoammonium phosphate (MAP, P_2O_5 160 kg/hm²) and diammonium phosphate (DAP, P_2O_5 160 kg/hm²). During the experiment, we measured the change in total phosphorus (TP) and total dissolved phosphorus (TDP) in the leachate from each column. 【Result】 Phosphorus in the top 0~40 cm soil was leached. The TP concentration in the leachate from the soil with *PAC* of 7.72% was 1.91 times higher than that from the soil with *PAC* of 0.86% at early stage. The TDP was the dominant P in the leachate, accounting for 68.8%~82.9% of TP. Applying phosphate fertilizer to the soil with high *PAC* significantly increased P leaching, compared to applying to the soil with low *PAC*. Compared with MCP and MAP, DAP significantly increased P leaching. For all treatments, phosphorus loss from leaching was less than 2% of the applied phosphate fertilizer. 【Conclusion】 Phosphorous leaching from DAP was the highest among all three phosphorus fertilizers. The soil with high *PAC* risks phosphorous leaching when phosphate fertilizer was used.

Key words: phosphorus fertilizer; leaching loss; chestnut soil; phosphorus activation coefficient

责任编辑: 韩 洋