

我国 4 种土壤磷素淋溶流失特征

刘娟¹, 包立^{1,2}, 张乃明^{1,2}, 张淑香³

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201;
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 磷素是水体富营养化的主要限制因子, 地表水磷的污染负荷主要来源于农业面源污染。采集黑土、潮土、红壤和水稻土 4 种土壤, 采用土柱模拟的试验方法, 研究磷素在 4 种土壤剖面中空间分布特征, 以及土壤渗漏液中 TP、TDP 的含量、动态变化以及流失量特征。结果表明: (1) 不同类型土壤全磷和有效磷含量差异性显著, 由高到低依次为水稻土 > 潮土 > 黑土 > 红壤; 黑土、红壤和水稻土土壤全磷和有效磷含量都表现出, 随土壤深度的增加, 不断降低; 而潮土剖面呈上下层高, 中间低的分布格局。(2) 4 种土壤渗漏液中占主导的磷形态不一致, 潮土以 MRP 占主导, 黑土和水稻土以 DOP 为主, 而红壤则以 PP 为主。土壤磷素动态变化方面, 潮土表现为 TP 含量先减后增再减, TDP 含量先增后减; 黑土表现为 TP 含量先增后减, TDP 含量持续下降; 红壤和水稻土 TP 和 TDP 含量变化不显著。(3) 相关分析表明, 4 种土壤中 Olsen-P 与渗漏液中 TP 呈指数关系, 具有极显著相关性。(4) 4 种土壤 TP、TDP 下渗流失量都以潮土最高, 其次是黑土和水稻土, 红壤流失量最小, 磷素流失以 TDP 为主。

关键词: 磷; 耕作土壤; 淋溶流失

中图分类号: S158.5; X523

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0064-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.011

Characteristics of Phosphorus Leaching Losses in Four Soils in China

LIU Juan¹, BAO Li^{1,2}, ZHANG Naiming^{1,2}, ZHANG Shuxiang³

(1. College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University,

Kunming 650201; 2. Yunnan Soil Fertility and Pollution Restoration Laboratory, Kunming 650201;

3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Phosphorus was the main limiting factor of eutrophication. Previous studies have shown that the pollution load of phosphorus in surface water mainly comes from agricultural non-point source pollution. This paper collected four main cultivated soils, i. e., black soil, fluvo-aquic soil, red soil and paddy soil, and a soil column simulation experiment was conducted to study the spatial distribution characteristics of phosphorus in four soil profiles, as well as TP, TDP contents, dynamics and loss characteristics of soil leakage. The results showed that: (1) The contents of total phosphorus and available phosphorus in different soils were significantly different; Paddy soil > fluvo-aquic soil > black soil > red soil. The contents of total phosphorus and available phosphorus in black soil, red soil and paddy soil all showed the decreasing trends with the increase of soil depth, but the profile of fluvo-aquic soil presented the distribution pattern that upper and lower lawyer was high, and middle was low. (2) The dominant forms of phosphorus in the four soils leakage were inconsistent. The fluvo-aquic soil was dominated by MRP, black soil and paddy soil were dominated by DOP, while red soil by PP. In terms of the dynamics of soil phosphorus, the contents of TP in fluvo-aquic soil decreased first and increased next, and then decreased, while the TDP content increased first and then decreased. Black soil showed that TP content increased first and then decreased, while continuous decline in TDP content. TP and TDP contents in red soil and paddy soil did not vary significantly. (3) The correlation between Olsen-P in soil and TP in leachate was analyzed. It was found that there was an exponential relationship between Olsen-P and TP in leachate in four soils. (4) The highest TP and TDP leaching loss

收稿日期: 2018-02-27

资助项目: 云南省科技合作计划项目(2015IC022)

第一作者: 刘娟(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事面源污染防治研究。E-mail: 15587214232@163.com

通信作者: 张乃明(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤培肥与污染修复研究。E-mail: zhangnaiming@sina.com

was observed in fluvo-aquic soil, followed by the black soil and paddy soil, the smallest loss was in red soil. The largest proportion in phosphorus loss was TDP.

Keywords: phosphorus; tillage soil; leaching loss

磷是作物必需的重要营养元素,也是水体富营养化的主要限制因子^[1]。随着磷肥的不断投入,土壤中的磷素不断累积,提高了磷的迁移流失,给水环境造成了巨大威胁^[2]。黑土、潮土、水稻土和红壤都面临着土壤磷素累积的问题,土壤磷素累积甚至在局部地区接近饱和,最终可能发生迁移^[3]。如何科学管理土壤磷素并向水体迁移一直是各国研究的热点问题。已有研究^[4-5]发现,土壤中磷素可以通过渗漏发生迁移,可能增大水体富营养化的风险,淋溶流失也是土壤磷素流失的一种形式。大多数研究认为土壤磷素淋溶流失的形态主要是可溶性磷,也有少部分研究发现水稻土土壤磷素淋溶流失的主要形态是颗粒磷。且土壤中磷素达到一定水平,磷的流失量随着土壤磷素水平的提高而急剧增加。这些研究主要集中在对单一土壤的研究,而针对 4 种土壤磷素淋溶流失方面的系统研究较少。

全国土地利用数据预报结果显示,截至 2016 年,全国耕地面积为 13 495.66 万 hm²。东北黑土区和潮土耕地面积分别为 3 200 万 hm² 和 1 267 万 hm²,分别占我国耕地面积的 24.71% 和 9.39%,红壤带内耕地面积占全国耕地总面积的 36%^[6-7],而水稻土大约占全国耕地面

积的 20%,4 种土壤的耕地面积累积占我国耕地面积的 89.1%,为我国主要的耕地土壤,在我国分布较广,且 4 种典型土壤所在区域为我国粮食的主产区,都面临着磷素累积问题。本研究选取黑土、潮土、水稻土和红壤 4 种主要耕作土壤为研究对象,采用土柱模拟试验方法,探讨 4 种主要耕作土壤磷素淋溶流失特征,对于控制磷面源污染、促进农业可持续发展具有重要意义,同时也可以为磷肥的合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

供试土壤包括黑土(采自吉林公主岭)、潮土(采自河南)、水稻土(采自昆明宜良县)和红壤(采自昆明宜良县)4 种类型,于 2017 年 4 月按照“S”形 5 点采样法采集耕层土样(0—20 cm)及剖面土壤样品,土壤剖面按层次采样,自下而上分层采取,每个层次分为 0—20,20—40,40—60,60—80 cm 共 4 个层面,将野外采集的土样分层充分混匀,剔除土样中的根茬、动物残体和石块等杂物,土壤风干过筛(2 mm)备用。并于 2017 年 5 月测定土壤的主要理化性质,供试土壤(0—20 cm)的主要理化特征见表 1、表 2。

表 1 供试土壤化学特性

土壤类型	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碳酸钙/ (g · kg ⁻¹)	无定形氧化铁/ (g · kg ⁻¹)	无定形氧化铝/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)
黑土	7.46	22.36	16.00	0.48	8.45	58.91	0.71
红壤	5.57	14.33	12.25	0.61	11.28	29.07	0.59
潮土	8.16	16.97	49.00	0.35	7.98	33.37	0.91
水稻土	5.03	9.34	6.25	1.74	10.81	107.85	1.19

表 2 供试土壤物理特性

土壤类型	颗粒组成/%					土壤质地
	2.0~0.2 mm	<0.02 mm	<0.002 mm	0.02~0.002 mm	2.0~0.02 mm	
黑土	7.40	54.92	34.85	20.07	45.08	壤质黏土
红壤	10.00	62.29	33.01	29.28	37.71	壤质黏土
潮土	1.20	45.20	29.56	15.64	54.80	砂质黏土
水稻土	3.10	51.63	45.43	6.19	48.37	黏土

1.2 渗漏试验装置

将 PVC 管(直径为 11 cm,横截面积为 78.5 cm²)截取为 4 段,每段 20 cm,截取后的 PVC 管底端用尼龙网包裹,然后将不同类型土壤装入土柱,用 PVC 接口连接成高 80 cm 的土柱桶。土柱底部装约 2 cm 厚的石英砂,在石英砂与土壤之间放置一张 300 目的纱网。土壤用 PVC 封盖盖住底部,在封盖底上

打一个直径为 0.5 cm 的小孔,用橡胶塞将排水管固定便于收集渗漏液,将土柱直立地放在架子上。每个土壤类型设 3 个重复。

采用质量法控制灌水量(土壤饱和持水量),灌水量大小以田间持水量为准,每周灌水 1 次,约 300 mL 超纯水,灌水时间为试验开始的第 7,14,21,28,35,42 天,于灌水当天采集渗漏液,测量渗漏液的体积。

1.3 分析项目与方法

渗漏液中总磷(TP)采用过硫酸钾氧化—钼酸铵分光光度法测定;可溶性总磷(TDP)采用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤,过硫酸钾氧化—钼酸铵分光光度法测定;渗漏液中钼酸盐反应磷(MRP)采用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤,钼锑抗直接显色分析样品磷含量;颗粒磷(PP)为 TP 与 TDP 的差值;可溶性有机磷(DOP)为 TDP 与 MRP 的差值^[4];土壤全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定;土壤 Olsen-P 采用 $0.5\ \text{mol/L}$ NaHCO_3 溶液浸提,磷钼蓝比色法测定;机械组成采用吸管法测定;无定形氧化铁采用草酸铵溶液提取—邻菲罗啉显色法测定;无定形氧化铝采用草酸铵溶液提取—铝试剂比色法测定;碳酸钙采用气量法测定^[8]。

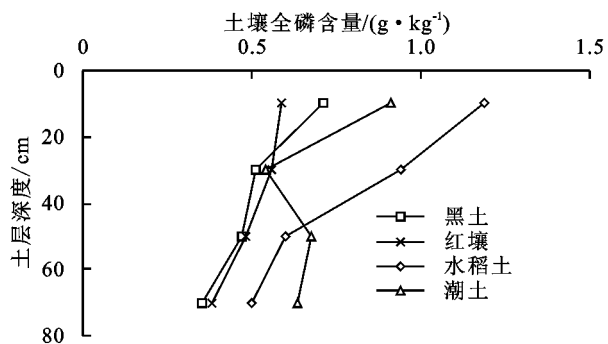


图 1 土壤磷素剖面分布

土壤全磷量是指土壤中各种形态磷素的总和。从我国第二次土壤普查资料可知,我国耕层土壤全磷含量的范围大致在 $0.44\sim 0.85\ \text{g/kg}$,最高 $1.8\ \text{g/kg}$,最低 $0.17\ \text{g/kg}$ 。供试土壤的全磷范围在 $0.35\sim 1.19\ \text{g/kg}$,其中水稻土、潮土、黑土和红壤的全磷的平均值($0\sim 80\ \text{cm}$)分别为 $0.81, 0.69, 0.51, 0.50\ \text{g/kg}$,由高到低依次为水稻土>潮土>黑土>红壤。从磷素的剖面分布来看,水稻土、黑土和红壤的都呈现出随着土层的增加,土壤全磷量明显降低的趋势。而潮土剖面呈现上下层高,中间低的分布格局。全磷高含量主要集中在土壤表层,水稻土、潮土、黑土和红壤在 $0\sim 20\ \text{cm}$ 的含量平均值分别为 $1.19, 0.91, 0.71, 0.59\ \text{g/kg}$,分别占整个剖面全磷的 $36.81\%, 32.93\%, 34.76\%, 29.34\%$ 。不同土壤类型之间土壤全磷差异显著,表层全磷含量从高到低为水稻土>潮土>黑土>红壤。将 4 种不同土壤类型土壤 $0\sim 20\ \text{cm}$ 全磷含量与全国第二次土壤普查的养分分级标准进行比较,水稻土处于一级水平,潮土处于二级水平,黑土和红壤处于三级水平,全磷水平整体较高。

供试土壤 Olsen-P 含量的范围在 $2.46\sim 107.85\ \text{mg/kg}$,水稻土、潮土、黑土和红壤的 Olsen-P 含量的平均值($0\sim 80\ \text{cm}$)分别是 $46.40, 22.33, 19.66, 19.14\ \text{mg/kg}$ 。从磷素的剖面分布来看,Olsen-P 含量表现出与全磷相同的趋势,即随着土层的加深,

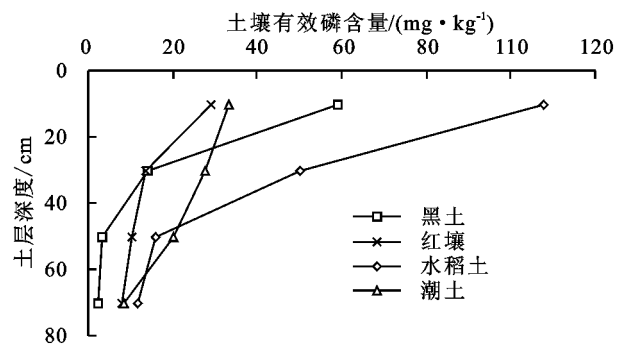
1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 软件进行整理和作图,采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和显著性检验,检验方法采用 ANOVA 法,显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤磷素剖面分布状况

由图 1 可知,土壤剖面中磷素的不同层次磷的累积和淋溶的关系十分密切。4 种土壤全磷和有效磷含量差别很大,由高到低依次为水稻土>潮土>黑土>红壤;水稻土、黑土和红壤中的磷含量在土壤剖面上的分布特点为上层高下层低,而潮土剖面呈现上下层高,中间低的分布格局。



Olsen-P 含量呈递减趋势。水稻土、潮土、黑土和红壤在土壤表层含量最高,其平均值分别为 $107.85, 33.37, 58.91, 29.07\ \text{mg/kg}$,分别占整个土壤剖面的 $58.12\%, 37.35\%, 74.92\%, 37.98\%$,这说明 4 种土壤类型中磷素主要累积在土壤表层,以水稻土和黑土最为明显。将 4 种不同土壤类型土壤 $0\sim 20\ \text{cm}$ 有效磷含量与全国第二次土壤普查的养分分级标准进行比较,水稻土和黑土处于一级水平,潮土和红壤处于二级水平,4 种土壤中 Olsen-P 含量都存在明显的累积,磷素在土壤中的累积是发生淋溶的先决条件。

2.2 土壤中磷素纵向迁移特征

2.2.1 土壤渗漏液中各磷形态平均含量 由图 2 可知, $0\sim 20\ \text{cm}$ 土层潮土、黑土、红壤和水稻土渗漏液中 TP、TDP、PP、MRP、DOP 含量的范围分别为 $0.27\sim 0.62, 0.11\sim 0.54, 0.08\sim 0.16, 0.05\sim 0.38, 0.05\sim 0.19\ \text{mg/L}$,渗漏液中 TP、TDP 和表现为潮土>水稻土>黑土>红壤,DOP 含量表现为黑土>潮土>水稻土>红壤,而 MRP 含量存在潮土>水稻土>红壤>黑土的规律。4 种土壤渗漏液中占主导的磷形态不一致,潮土以 MRP 占主导,黑土和水稻土以 DOP 为主,而红壤则以 PP 为主。

土壤剖面是一个连续性的过程,从土壤表层到亚表层直至土壤底层,各土层是相互关联的,从 $0\sim 20\ \text{cm}$ 扩大至 $0\sim 80\ \text{cm}$,渗漏液中各磷形态规律性与土

壤表层相似,但总量发生了变化,TP,TDP,MRP 和 DOP 含量均表现为黑土>潮土>红壤>水稻土,渗漏液中各磷形态占比与 0—20 cm 土层相比变化不大,潮土以 MRP 占主导,黑土和水稻土以 DOP 为

主,而红壤则以 PP 为主。4 种土壤渗漏液中各磷形态平均值均高于通常认为的水体富营养化阈值(0.02 mg/L),说明水稻土、潮土、红壤和黑土土壤磷素通过纵向迁移淋失,可能对水体富营养化具有贡献作用。

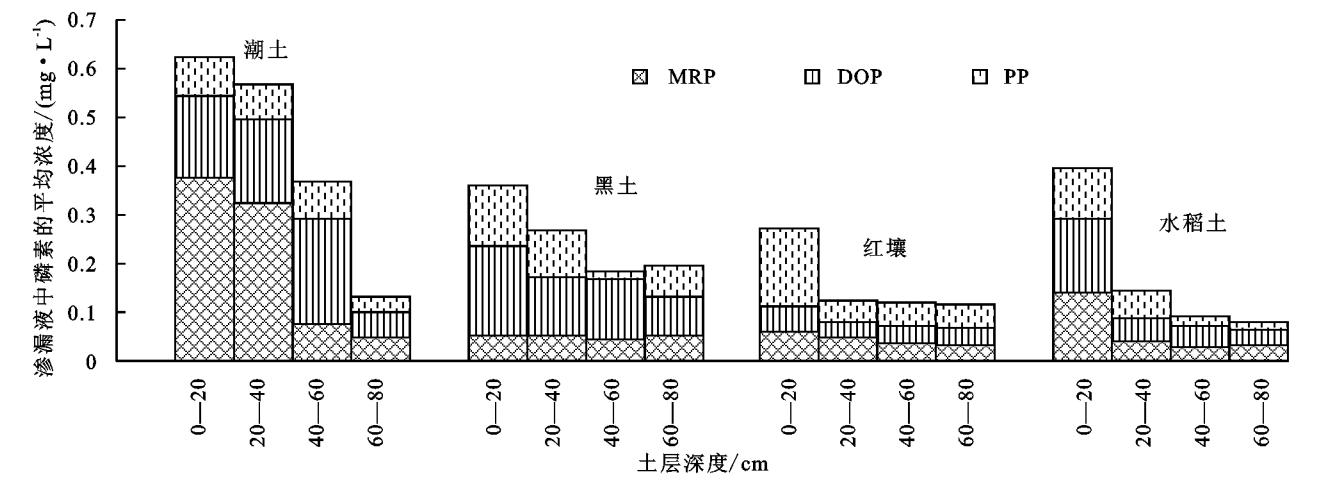


图 2 土壤各土层渗漏液中磷素的平均含量

2.2.2 渗漏液中 TP、TDP 浓度的动态变化 由于磷素在土壤中移动较小,累积在土壤中磷素主要分布在 0—40 cm 土层。由图 3 可知,4 种土壤渗漏液 TP 浓度随时间变化整体呈现出先上升后下降,然后趋于平缓的趋势,但各自浓度变化的情况不尽相同。黑土和潮土的变化趋势波动大,红壤和水稻土的变化趋势平缓。黑土 TP 含量随着时间的增加呈缓慢上升趋势,在第 21 天达到最大值 0.31 mg/L,在第 28 天下渗作用下 TP 含量明显降低为 0.12 mg/L 后趋于平缓;潮土渗漏初期 TP 含量较高,达 0.56 mg/L,短暂降低后急剧增加,在第 21 天出现峰值 0.63 mg/L,第 21 天以后 TP 浓度随渗漏时间的增加而减少,整体呈现先下降后上升,再下降的趋势。红壤和水稻土在整个渗漏过程中 TP 浓度变化幅度小,在第 21 天达到最大值,分别为 0.16,0.19 mg/L。

潮土、黑土、红壤和水稻土均达到极显著正相关,其相关系数分别为 0.954** ($n=36$), 0.931** ($n=36$), 0.750** ($n=36$), 0.915** ($n=30$),潮土的相关性最高。说明土壤中含磷不一致,含磷高的土壤渗漏液中 TP 含量也会相应地高。相反,含磷低的土壤渗漏液中的 TP 含量低,随着土壤磷水平的提高,土壤磷素渗漏迁移的风险相应增加。同时可以推断,不能简单地采用土壤 Olsen-P 法表征土壤磷渗漏淋失的浓度,可能存在一个特定土壤 Olsen-P 临界值,并在此基础上可以分段预测 4 种土壤向地下流失的潜能。

由图 4 可知,4 种土壤渗漏液中 TDP 浓度变化趋势与 TP 的变化趋势大致相同,又略有差异。潮土渗漏液中 TDP 含量仍然保持在较高水平,先随时间的增加而增大,其初始浓度为 0.47 mg/L,在第 21 天取得最大值 0.51 mg/L,然后 TDP 浓度开始下降,大约 14 天后下降趋于平缓并保持在一定水平。黑土、红壤和水稻土的变化程度明显降低。黑土 TDP 浓度整体呈下降趋势,在第 7 天取得最大值 0.18 mg/L,然后随时间的变化浓度逐渐降低。红壤和水稻土的 TDP 浓度下降趋势不明显,浓度平均值范围分别为 0.08~0.163,0.10~0.185 mg/L。

2.3 土壤有效磷与渗漏液中总磷浓度的相关性分析 由表 3 可知,4 种土壤 Olsen-P 含量与渗漏液中的 TP 含量均呈指数关系,其中,不同磷水平条件下

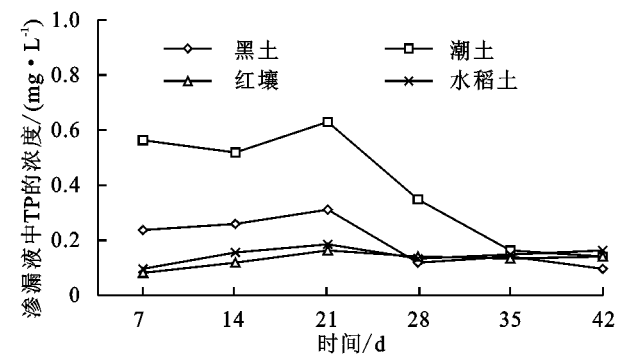


图 3 模拟试验中土壤渗漏液 TP 浓度动态变化

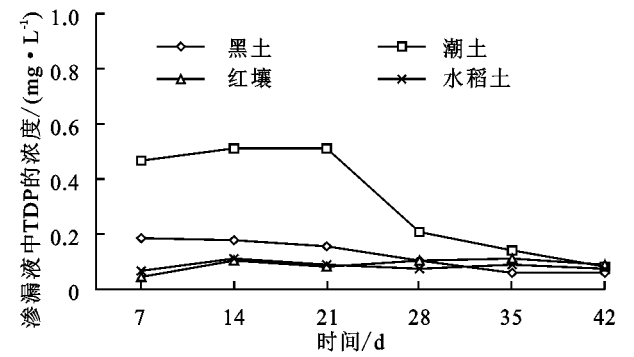


图 4 模拟试验中土壤渗漏液 TDP 浓度动态变化

表 3 土壤渗漏液中 TP 浓度与土壤中 Olsen-P 含量的回归分析

土壤类型	拟合方程	相关系数
潮土	$y=0.1477e^{0.041x}$	0.954 **
黑土	$y=0.1820e^{0.0263x}$	0.931 **
红壤	$y=0.1064e^{0.015x}$	0.750 **
水稻土	$y=0.0852e^{0.0149x}$	0.915 **

注: x 为土壤 Olsen-P 含量(mg/kg); y 为渗漏液中 TP 浓度(mg/L)。

2.4 土壤磷素下渗流失量的比较

由图 5 可知,4 种土壤的 TP 流失量(0—80 cm)分别为 117.59,52.75,60.91,46.96 mg/m²,潮土显著高于其他 3 种土壤,而黑土和水稻土之间、水稻土和红壤之间不存在显著性差异。土壤磷素下渗流失量以潮土最高,其次是黑土和水稻土,红壤流失量最小。虽然不同类型土壤 TP 下渗流失量差异大,但在土壤剖面 0—80 cm 深度范围内均呈现出随着剖面深度的增加,TP 流失量逐渐减少后趋于稳定。土壤表层(0—20 cm)土壤 TP 流失量大,潮土、水稻土、黑土和红壤在表层的下渗流失量分别为 53.30,24.85,21.07,18.34 mg/m²,分别占到剖面流失总量的 45.32%,47.11%,34.59%,39.05%。方差分析表明,黑土和红壤其他各层次间没有显著差异,潮土其他各层次都存在极显著性差异,水稻土 20—40,60—80 cm 之间存在显著性差异,而 20—40,40—60 cm 以及 40—60,60—80 cm 之间差异不显著。

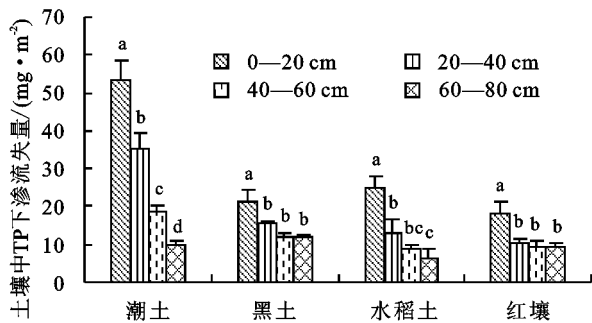


图 5 土壤中 TP 下渗流失量

潮土、水稻土、黑土和红壤的 TDP 下渗流失量(0—80 cm)分别为 92.59,35.24,44.33,35.23 mg/m²,潮土输出的 TDP 下渗流失量最高,而其他 3 种土壤类型之间差异不明显,土壤磷素下渗流失量大致呈潮土>黑土>水稻土>红壤的规律,且可溶性总磷(TDP)表现出了与总磷(TP)相一致的流失特征。与本研究 TP 下渗流失量相比,TDP 下渗量分别占到 TP 流失总量的 78.74%,66.82%,72.78%,75.03%。由此可见,在磷素的纵向迁移流失的过程中,磷素流失以 TDP 流失为主。从垂直方向上来看,不同土壤类型 TDP 的下渗流失量表现为随着土层的加深,流失量不断降低。方差分析显示,不同土壤类型土壤渗漏

液的 TDP 流失量,尽管从表层到底层表现为下降趋势,但不同土壤又存在区别。黑土、水稻土和红壤都表现为土壤表层(0—20 cm)显著高于其他各层次土壤,其他各层次间没有显著差异。而潮土各层次都存在极显著性差异(图 6)。

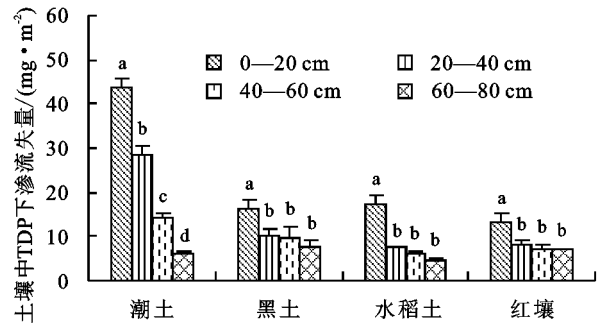


图 6 土壤中 TDP 下渗流失量

3 讨论

3.1 不同土壤类型土壤中磷素含量差异

本研究发现,4 种不同土壤类型磷素含量差别较大,全磷含量高低为水稻土>潮土>黑土>红壤。这与邱亚群等^[9]的研究结论相似。4 种土壤全磷和有效磷表聚特征明显,水稻土、潮土、黑土和红壤 0—20 cm 总磷含量分别占整个剖面总磷的 36.81%,32.93%,34.76%,29.34%,有效磷含量分别占整个土壤剖面的 58.12%,37.35%,74.92%,37.98%。0—20 cm 土层全磷含量从高到低为水稻土>潮土>黑土>红壤,0—20 cm 土层 Olsen-P 含量从高到低为水稻土>黑土>潮土>红壤,这可能与土壤母质类型、酸碱度、有机质以及土壤质地有关^[10]。

不同土层是在土壤长期发育过程中形成的,各土层的养分特征受到土壤组成与性质的影响,不同土层会表现出不同的颜色、结构、紧实度和其他形态特征^[11]。本研究发现,水稻土、黑土和红壤全磷和有效磷含量在 0—20 cm 最高,随土壤剖面的加深,呈降低趋势,这主要是与土壤对磷的固定作用有关,土壤磷在剖面中移动性较差,农业生产一般把磷肥施在土壤表层,磷肥当季利用率低,致使磷肥残留在土壤耕层,造成磷的空间分布不均匀。而潮土剖面呈上下层高,中间低的分布格局。这与黄绍敏等^[12]在潮土上的磷素剖面分布和樊红柱等^[13]在钙质紫色水稻土上的磷素剖面分布规律结果一致。土壤剖面磷含量上下高、中间低的变化趋势除了与土壤类型、施肥状况等因素有关外^[14],还与磷在土壤中向下淋溶有关^[12,15]。

3.2 不同类型土壤渗漏迁移规律及流失量特征

传统观念认为,土壤中的磷沿剖面垂直向下淋溶的可能性不大。20 世纪 90 年代后,国外许多学者对

土壤的磷素流失相关成果表明,土壤中磷素以淋溶形式损失的量与以地表径流和土壤侵蚀形式损失的量相当或者更大,土壤磷素渗漏迁移也可能是磷流失的一条重要途径^[16]。本研究得出,4种土壤渗漏液中占主导的磷形态不一致,在0—20,0—80 cm土层,潮土以MRP占主导,黑土和水稻土以DOP为主,而红壤则以PP为主,主要是因为潮土土壤本身肥力不高,但潮土所在区域为主要的农耕区,长期施用磷肥导致渗漏液中MRP含量高,而黑土自身肥力水平高,有机质含量也高,所以可溶性DOP也高,红壤所在地多以坡耕地为主,容易受到侵蚀,侵蚀过程中PP占比大,水稻土因为长期的水耕熟化作用以及实行稻菜轮作过程中施肥量过多,本身肥力水平也高,导致渗漏液中DOP含量占主导。土壤剖面是一个连续性的过程,从土壤表层到亚表层直至土壤底层,各土层是相互关联的,从0—20 cm扩大至0—80 cm,渗漏液中各磷形态规律性与土壤表层相似,但总量发生了变化,TP,TDP,MRP和DOP含量表现为黑土>潮土>红壤>水稻土,黑土渗漏液中磷素含量要高于其他几种,主要是因为黑土本身肥力水平高,而且有机质含量也高,导致固磷能力弱。

不同土壤类型下渗流失量结果表明,潮土、水稻土、黑土和红壤4种土壤类型下渗TP流失量以潮土最高,其次是黑土和水稻土,红壤流失量最小。土壤磷素迁移量与土壤类型有直接关系,还可能与施肥状况与土壤磷的释放有关。潮土土壤质地为砂质黏土,黏粒含量较其他几种土壤少,土壤磷的移动扩散性强。黑土土壤本身有效磷含量较高,所以渗漏液磷素流失量大。水稻土土壤本身的磷素含量高,但是水稻土土壤呈酸性,无定形氧化铁、铝含量高,土壤颗粒以黏粒为主,对磷的吸附固定能力强,降低了磷向下淋溶。红壤也为酸性土壤,无定形氧化铁、铝含量高,对土壤具有较强的固定作用。不同类型土壤磷素迁移的形态以可溶性为主,潮土、水稻土、黑土和红壤TDP下渗流失量分别占到TP流失总量的78.74%,66.82%,72.78%,75.03%。这与项大力等^[3]对壤土磷素淋失试验得出的不同灌溉水平渗漏液中各形态磷的累积淋失量可溶性全磷分别占总淋失磷量的66%,72%,75%以及陆欣欣等^[17]通过野外测坑定位试验得出的可溶性磷是磷素渗漏流失的主要形态,占磷素渗漏流失总量的62.12%~69.95%结论相似。

3.3 土壤渗漏液中磷浓度与土壤有效磷含量的关系

土壤中磷的累积与淋溶的关系十分密切。土壤中有效磷含量是影响土壤渗漏水中各种形态磷的最

主要内因^[18]。本研究发现,4种土壤Olsen-P含量与渗漏液中的TP含量均呈指数关系,可能存在一个特定土壤Olsen-P临界值,其大小有待于进一步研究。

已有研究^[19]表明,当土壤中Olsen-P含量超过临界值后,渗漏液中磷浓度会迅速增加,尽管不同土壤存在差异,但排出的水足以引起水体富营养化。黄绍敏等^[12]研究表明,石灰性潮土磷淋失临界值为40 mg/kg;周全来等^[20]得出水稻土的Olsen-P环境阈值为82.7 mg/kg;徐红娇等^[4]得出酸性红壤的磷素阈值为26.08 mg/kg,而关于黑土淋溶及环境阈值的研究很少,目前还没有相关报道。本研究中潮土、水稻土、黑土和红壤在土壤表层有效磷含量分别为33.37,107.85,58.91,29.07 mg/kg,与其他研究结果相比较,土壤中有效磷含量接近或高于临界值浓度^[12-14],且4种不同土壤渗漏液浓度也均高于通常认为的水体富营养化阈值(0.02 mg/L),说明土壤有效磷的累积会大大提高了土壤磷素淋溶及径流的风险。

4 结论

(1)不同类型土壤全磷和有效磷含量差别大,由高到低依次为水稻土>潮土>黑土>红壤;从磷素的剖面分布来看,土壤全磷和有效磷含量都表现出,随土壤剖面的加深,不断降低的趋势。

(2)4种土壤渗漏液中占主导的磷形态不一致,潮土以MRP为主,黑土和水稻土以DOP为主,而红壤则以PP为主。

(3)从土壤磷素渗漏液动态变化方面来看,4种土壤0—40 cm土层的TP和TDP随时间变化表现出不同的规律。潮土表现为TP含量先减后增再减,TDP含量先增后减;黑土表现为TP含量先增后减,TDP含量持续下降;红壤和水稻土TP和TDP含量下降趋势不明显。

(4)4种土壤中Olsen-P含量与渗漏液中TP之间符合指数关系,具有极显著相关性,但转折点大小有待于进一步研究。

(5)4种土壤TP、TDP下渗流失量表现为潮土>黑土>水稻土>红壤。不同类型土壤TP和TDP迁移量差异显著,但在0—80 cm土层深度范围内均随着土层深度的增加,迁移量逐渐减少后趋于稳定。

参考文献:

- [1] 王静,郭熙盛,王允青,等.保护性耕作与氮肥后移对巢湖流域麦田磷素流失的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(6):1152-1159.
- [2] 叶玉适,梁新强,李亮,等.不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J].环境科学学报,

- 2015, 35(4):1125-1135.
- [3] 项大力, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉水平对壤土磷素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):112-117.
- [4] 徐红娇, 包立, 张乃明, 等. 滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):267-271.
- [5] 彭世彰, 黄万勇, 杨士红, 等. 田间渗漏强度对稻田磷素淋溶损失的影响[J]. 节水灌溉, 2013(9):36-39.
- [6] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(11):2113-2125.
- [7] 黄国勤, 赵其国. 红壤生态学[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5173-5181.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:65-67.
- [9] 邱亚群, 甘国娟, 刘伟, 等. 湖南典型土壤磷素剖面分布特征及其流失风险[J]. 中国农学通报, 2012, 28(8):223-227.
- [10] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:202-203.
- [11] 刘颖, 魏丹, 李玉影, 等. 黑龙江省主要类型土壤剖面养分分布研究[J]. 黑龙江农业科学, 2015(11):31-35.
- [12] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):93-98.
- [13] 樊红柱, 陈庆瑞, 秦鱼生, 等. 长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(8):1520-1529.
- [14] Shafqat M N, Pierzynski G M. The effect of various sources and dose of phosphorus on residual soil test phosphorus in different soils [J]. Catena, 2013, 105: 21-28.
- [15] 秦鱼生, 涂仕华, 孙锡发, 等. 长期定位施肥对碱性紫色土磷素迁移与累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5):880-885.
- [16] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 28(9):1832-1838.
- [17] 陆欣欣, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4):394-400.
- [18] 吴家森, 陈闻, 姜培坤, 等. 不同施肥对雷竹林土壤氮、磷渗漏流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):33-37.
- [19] 王荣萍, 丁效东, 廖新荣, 等. 华南地区蔬菜地不同质地土壤磷素淋失临界值研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(19):246-250.
- [20] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 施磷对稻田土壤及田面水磷浓度影响的模拟[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1845-1848.
- (上接第 63 页)
- [14] 张锐波, 张丽萍, 钱婧, 等. 雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙影响强度研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5):206-212.
- [15] 李盼盼, 王兵, 刘国彬, 等. 茵陈蒿群落垂直结构对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2):40-44.
- [16] 徐新创, 张学珍, 戴尔阜, 等. 1961—2010 年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J]. 地理研究, 2014, 33(7):1335-1347.
- [17] 张向炎, 史学正, 于东升, 等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. 水科学进展, 2010, 21(1):23-29.
- [18] 吴佳, 王林华, 李占斌, 等. 黄土高原主要秋作物坡地降雨入渗特征参数研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):115-119.
- [19] General administration of quality supervision, inspection and quarantine of China. GB/T 15774—2008 calculation method of benefit in soil and water conservation [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [20] 冯秀, 查轩, 黄少燕. 人工模拟降雨条件下花岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(1):19-23.
- [21] 高婵婵, 赵传燕, 王超, 等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1):117-121, 126.
- [22] 张军, 李占斌, 李鹏, 等. 移动降雨条件下坡面产流产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1):1-4, 11.