

不同施肥处理对三峡库区柑橘园土壤氮磷淋失影响

王甜¹, 黄志霖¹, 曾立雄¹, 肖文发¹, 宋文梅²

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 秭归县林业局, 湖北 宜昌 443699)

摘要: 在2017年8月利用原状土柱模拟淋溶试验对三峡库区秭归县柑橘园土壤的氮磷淋溶流失进行研究, 探讨不同施肥处理对土壤氮、磷淋失的影响, 为三峡库区农业面源污染的防控提供理论依据。试验设置6个处理, 分别为不施肥处理(T0)、减量施肥(T1)、常量施肥(T2)、增量施肥(T3)、常量复合肥A施肥(T4)和常量复合肥B施肥(T5)。结果表明: (1) 不同施肥处理下, 柑橘园土壤淋滤液中总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)的淋溶浓度范围分别为37.16~163.07, 0.61~6.69, 27.54~79.38, 2.37~7.10 mg/L。(2) 施肥量和施肥种类皆为土壤中氮磷淋溶的影响因素。在相同施肥种类下, 土壤氮磷淋溶浓度随施肥量增加而显著增加, 但施肥量高到一定程度后, 淋溶浓度增长幅度会降低。在相同施氮量下, 硝态氮的淋失受施肥种类影响最大, 铵态氮最小。(3) 在土壤淋滤液中, 硝态氮为可溶性氮主要淋失形态, 其淋失量占TN淋失量的比率为29.72%~46.18%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量的比重为1.09%~2.05%。从研究结果推论, 常量复合肥A施肥处理更有利于肥料氮向供植物吸收可溶性氮转化并降低施肥后土壤中氮素累积的风险。

关键词: 三峡库区; 柑橘园土壤; 施肥; 氮磷; 淋溶

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0053-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.009

Effects of Different Fertilization on Nitrogen and Phosphorus Leaching of Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area

WANG Tian¹, HUANG Zhilin¹, ZENG Lixiong¹, XIAO Wenfa¹, SONG Wenmei²

(1. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 2. Zigui County Forestry Administration, Yichang, Hubei 443699)

Abstract: The leaching of soil nitrogen and phosphorus in the citrus orchard of Zigui County of the Three Gorges Reservoir Area were studied in August 2017 by using the original soil column simulated experiment, and the effects of different fertilization treatments on soil nitrogen and phosphorus leaching were discussed, which provided a theoretical basis for the prevention and control of agricultural non-point pollution in this region. The results were as follows: (1) The leaching concentration of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) and ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) in the filtrate of citrus orchard under different fertilization treatments were 37.16~163.07, 0.61~6.69, 27.54~79.38 and 2.37~7.10 mg/L, respectively. (2) Both the amount of fertilizer and the type of fertilization were the factors affecting the leaching of nitrogen and phosphorus in soil. Under the same fertilization treatment, the soil nitrogen and phosphorus leaching concentration increased significantly with the increase of the amount of fertilizer, and then the increase reduced. Under the same nitrogen application rate, the leaching of nitrate nitrogen was most affected by the type of fertilizer, while the leaching of ammonium nitrogen was the smallest. (3) In soil filtrate, nitrate nitrogen was the main leaching form of soluble nitrogen, and the ratio of leaching loss and total nitrogen leaching was 29.72%~46.18%, and the proportion of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ leaching loss was 1.09%~2.05%. The finding indicate that the treatment of constant compound fertilizer is more beneficial to the conversion of fertilizer nitrogen to soluble nitrogen for plant absorption and to reduction the accumulation of nitrogen in soil after fertilization.

Keywords: the Three Gorges Reservoir Area; citrus orchard soil; fertilization; nitrogen and phosphorus; leaching

三峡库区在三峡工程竣工后,其生态环境受到了巨大的影响,环境承载力降低,加上大量的移民活动,使得库区人地矛盾突出,大量的化肥和农药进入库区水体,导致库区农业面源污染日渐加剧,库区水体水质富营养化严重^[1-4]。从 2008—2017 年,经统计,库区每年流失氮肥量在 7 500~10 196 t,占所施氮肥量的 9.76%~10%,磷肥 1 600~1 783 t,占所施磷肥量的 4.72%~5.77%^[5-7]。

位于三峡库区第一县的秭归县,独特的地理位置和三峡河谷气候使其成为柑橘种植适宜区,在三峡工程建成后,夏季气温平均降低 1.2 ℃,冬季气温平均增高 1.3 ℃,使气候条件更有利于柑橘生产^[8]。到 2017 年为止,柑橘园面积占全部农用地面积的 35.84%^[6]。然而,经过调查发现,为了获得更可观的经济效益,柑橘园在种植过程中存在着不合理的施肥结构和不科学的施肥方法,造成土壤中氮磷大量盈余,再加上当地特殊的雨热同期气候,极易导致土壤酸化,土壤有机质和总氮、总磷、可溶性氮的增加和氮磷流失,从而导致三峡库区水体受到污染^[9-10]。但目前针对三峡库区氮磷流失的研

究,多集中在紫色土坡耕地上随地表径流而流失的氮磷^[11-12],对土壤中氮磷淋溶流失的研究较少,对于柑橘园土壤氮磷淋溶流失的研究则更加少有。因此本研究以秭归县柑橘园土壤作为研究对象,根据对当地农事活动的调查,通过原状土柱模拟试验方法,研究不同施肥处理下土壤氮磷淋溶流失的变化,以期为三峡库区柑橘园土壤养分垂直运移转化机理研究提供数据支撑,从而指导当地柑橘园科学合理的施肥,同时也为三峡库区农业面源污染防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在湖北省宜昌市秭归县三峡库区森林生态系统观测站(110°18′36″ E,30°37′52″ N),该站位于三峡库区,属于典型亚热带大陆性季风气候,年平均气温 7.8~18 ℃,无霜期 205~306 d,年降水量 950~1 600 mm,且时空分布不均,5—9 月降水量占全年降水量的 70%左右^[13]。试验土柱土壤取自秭归县柑橘园试验地,基本性质见表 1。

表 1 供试土壤基本性质

土地利用 类型	土壤 类型	海拔/ m	采样 深度/cm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	田间 持水量/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
柑橘园	黄壤土	285	60	17.65	1.68	1.25	10.46	0.24	13.58	1.35

1.2 试验装置

试验中自制简易淋溶装置,主体由 PVC 管制成(直径 20 cm)。管体总长 80 cm,分为 3 段,依次为淋洗超高段(10 cm)、原状土柱段(60 cm)、砂石过滤段(10 cm)。

试验开始前,将 PVC 管竖直打入土壤中,在保证原状土不松动和原来结构情况下,取出土柱,下方盖上盖子,同时取一些土壤表层的浮土,将土柱和浮土编号后带回试验室。之后在土柱底层垫上 2 层纱布,纱布间填上粒径 2~5 mm 的石英砂(装柱前石英砂经盐酸浸泡 24 h,再用蒸馏水反复冲洗,烘干备用),将浮土与肥料混合均匀后用细纱布袋装好放在土壤表层铺平后再放 1 层纱布,一方面防止加水时对土壤表层产生冲击或结皮并减少水分挥发,另一方面使降水与土壤和肥料充分结合,土柱上方留出 10 cm 的超高以供浇灌。土柱填充好后用架子固定,下面连接淋滤液收集装置,上面连接加水装置。在采集原状土柱的同时,用环刀在相同地点相同土层深度取样,用冷藏箱带回实验室后分析土壤理化性质。

1.3 试验设计

在经过对当地农户施肥习惯调查和资料查阅后,得知当地柑橘园仍采用传统施肥模式,施肥投入结构不合理,只重视氮肥的施用,忽略其他元素,每年施氮量约为 515 kg/hm²,而我国氮肥年施用平均量为 300 kg/hm²。因此试验共设置 6 个处理:不施肥处理

(T0);减量施肥(T1);常量施肥(T2);增量施肥(T3);常量复合肥 A(N:P₂O₅:K₂O=20:10:10,T4);常量复合肥 B(N:P₂O₅:K₂O=18:5:22,T5)。其中,不施肥处理为对照组,每个处理 3 次重复,试验所用肥料皆一次性施入,施肥情况见表 2。

表 2 不同处理的施肥情况

施肥处理	施肥种类	施用量/(kg·hm ⁻²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T0	无	0	0	0
T1	尿素	250	0	0
T2	尿素	500	0	0
T3	尿素	750	0	0
T4	复合肥 A	500	250	250
T5	复合肥 B	500	139	612

在原状土柱中施加肥料后静置 24 h 后,向原状土柱内加入 1 000 mL 纯水,土壤淋滤液每次出流到 100 mL 时采集 1 次样品并对其进行编号,更换采样瓶直至土壤淋滤液不再流出为止,同时记录土壤淋滤液的起止时间及取样时间,每次试验监测时长为 72 h。样品采集后在 4 ℃ 冰箱保存备用,试验结束后取土柱表面和底层土壤对其理化性质进行分析。试验期间利用土壤温度计测得试验期间土壤平均温度为 22 ℃。

1.4 样品采集与测定

淋滤液中的总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定;可溶性氮中铵态氮(NH₄⁺—N)、硝态氮

($\text{NO}_3^- - \text{N}$)利用 Smartchem 140 型化学间断分析仪测定;土壤风干后过筛用 KCl 溶液浸提,5:1 水土比,振荡后静置,取上清液利用 Smartchem 140 型化学间断分析仪测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度;土壤全氮和全磷采用浓硫酸消煮—凯氏定氮法和 $\text{HClO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 消煮,钼锑抗比色法测定^[14]。采用 SPSS 22.0 对数据进行差异显著性检验,比较不同处理在 $p < 0.05$ 的显著性水平;采用 Excel 2010 和 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不停施肥处理下的氮素淋溶浓度的动态变化

由图 1 可知,整个淋溶试验中,土壤中 TN 的淋溶浓度在不同施肥处理下变化规律明显。在 T0~T3 处理下,TN 的淋溶峰值分别为 66.86,95.94,150.83,213.06 mg/L,且施肥量每增长 250 kg/hm²,淋溶浓度峰值增长幅度为 43.49%,57.21%,41.25%。可见在施肥种类相同时,氮素的淋溶浓度随施肥量增加而显著增加,但施肥量达到一定值后,淋溶浓度的增长幅度会下降。在 T2、T4 和 T5 处理下,施氮量相同,但 T4 和 T5 处理下的 TN 淋溶浓度峰值和平均值分别是 T2 的 1.19,1.14,1.67,1.69 倍。在施氮量相同,施肥种类不同时,施加复合肥后的 TN 淋溶浓度显著高于施加尿素。TN 的淋溶浓度在 6 种处理下的淋溶试验过程中,在整体上呈现先增加后减少的趋势。但对比施肥处理,未施肥处理下淋滤液中 TN 的淋溶浓度峰值出现最早,为淋滤液 300 mL 处,T1、T2、T4 和 T5 处理下的峰值出现在 400 mL 处,T3 处理下的峰值出现在 500 mL 处,可见施肥量越高,峰值出现的越晚。

由图 1 可知,可溶性氮的淋溶浓度在不同施肥处理下,其变化规律与 TN 存在差异。在淋溶试验过程中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋溶浓度的变化趋势与 TN 相似,主要为单峰曲线, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶浓度的变化趋势较 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 复杂。从淋溶浓度的峰值分布来看, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度峰值分布比较集中,T0 和 T1 处理下的峰值出现在淋滤液体积 500 mL 处,而 T2~T5 处理下的峰值都出现在淋滤液体积 400 mL 处,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度峰值主要分布在淋滤液体积 400 mL(T0、T4 和 T5 处理)和 500 mL(T1、T2 和 T3 处理)处。可以看出, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 受施肥量影响比较大,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 受施肥种类影响较大。出现这种结果可能是肥料施入土壤后,会在酶和微生物的帮助下分解为 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$,因此施肥量越高,土壤中转化后的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量会越高。此后 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在氧气充足的条件下被氧化为 NO_2^- ,而 NO_2^- 不稳定,易被氧化变为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,因此施用的肥料越易与土壤中的氧气和水发生反应,土壤中的

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量越高。且在各种形态的氮素中,从化学反应上看, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋失浓度峰值应晚于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ^[15],但 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 更易被土壤颗粒吸附,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 更易溶于水且残留在土壤中的氮多以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 形式存在^[16],所以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的峰值出现时间相差受多种因素影响,在本次试验中未能得到准确的结果,仍需进一步研究。

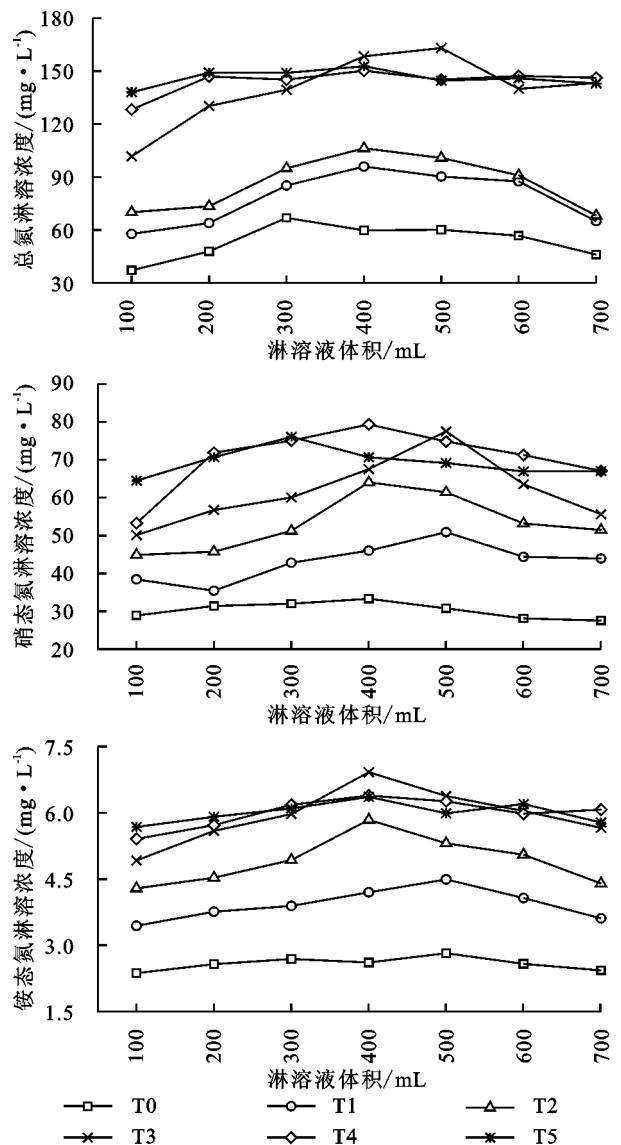


图1 不同处理下土壤中氮素淋溶浓度的动态变化

在整个淋溶过程中,T0~T3 处理下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶浓度峰值分别为 33.31,50.9,64.06,77.55 mg/L,随施肥量增长 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 峰值的增加幅度为 52.81%,25.85%,21.06%;T0~T3 处理下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的淋溶浓度峰值分别为 2.82,4.49,5.84,6.92,6.39,6.36 mg/L,随施肥量增长 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 峰值的增加幅度为 59.22%,30.07%,21.58%。从对比可以看出, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的增加幅度受施肥量影响大于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,且施肥量越高, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶浓度的增加幅度越小。在 T2、T4 和 T5 处理下的淋溶试验中, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的淋溶浓

度平均值在 T4、T5 处理下分别是 T2 的 1.24、1.10、1.13、1.10 倍,这与 TN 的试验结果相同,复合肥在同样施肥量下较尿素更易生成可溶性氮。

2.2 不同施肥处理下的磷素淋溶浓度的变化

由图 2 可知,在 T0~T3 处理中,未施加磷肥,因此淋滤液中 TP 主要来自于原状土柱内土壤残留的磷,所以 4 种处理下 TP 淋溶浓度差异较小且变化幅度不明显;T4 和 T5 处理中施加的肥料为复合肥,受施肥量影响,变化幅度明显,淋溶浓度峰值分别出现在淋滤液体积 400、500 mL 处。

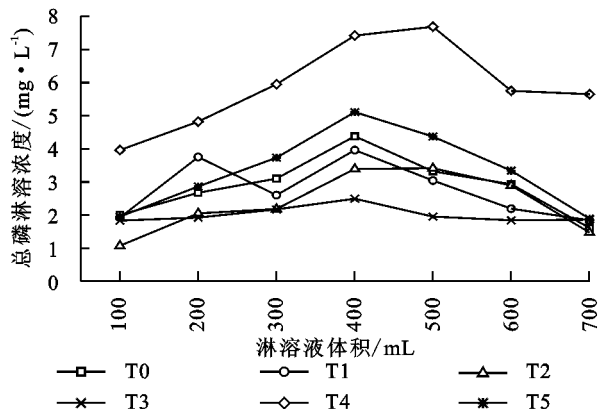


图 2 不同处理下土壤中磷素淋溶浓度的动态变化

从整个淋溶试验来看,6 种处理下,土壤淋滤液中 TP 的淋溶浓度范围分别为 0.61~1.38、0.75~1.60、0.47~1.41、0.83~1.49、2.96~6.69、0.95~4.11 mg/L。其中,T4 处理下的施磷量是 T5 处理的 1.8 倍,T4 处理下的 TP 淋溶浓度峰值和平均值分别是 T5 的 1.63、1.87 倍。同时,对比 6 种处理下的 TP 淋溶峰值和平均值比分别为 1.00 : 1.16 : 1.01 : 1.08 : 4.85 : 2.98 和 1.00 : 1.04 : 1.06 : 1.01 : 4.60 : 2.46。由此可见,土壤中磷素的淋失同样受磷肥施肥量的影响,但相对氮素,磷素增长的比例较低。这可能是因为土壤对磷素的固定性较强^[17]。但在本次淋溶试验中,6 种处理下土壤淋滤液中 TP 的最小淋溶浓度值为国际公认水华爆发的 TP 浓度临界值(0.02 mg/L)的 23.5 倍,且相同施磷量下的 TP 淋溶浓度较李同杰等^[18]在棕壤土上所作的试验及王静等^[19]在紫色土和石灰土上作的试验所得到的 TP 的淋溶浓度高。一方面可能是因为柑橘园由于之前不科学的施肥使得土壤中累积了大量磷素;另一方面有学者认为,沙质土壤更易产生磷素的淋失,因为此类土壤吸附能力较弱,易受水分作用影响^[20],即便土壤中残存磷素不多,但由于土壤性质使得土壤淋滤液中的磷素含量较高。

2.3 不同施肥处理下的氮磷淋溶量和淋失形态分析

由表 3 可知,6 种处理中施加的氮肥和磷肥都显著地提高了氮素和磷素的淋失量。在 T0~T3 处理下的 TN 淋失量顺序为 T3>T2>T1>T0,且为显著性增

加。其中,T1、T2 和 T3 处理下 TN 淋失量较 T0 处理上涨幅度分别为 50.15%、74.09%、141.68%,说明氮肥施肥量是土壤 TN 淋溶流失的重要影响因素,且证实了 Dise 等^[21]的论点,施肥量大于一定量后,氮素淋失量增长幅度会明显上升。对比 T2、T4 和 T5 处理下 TN 淋失量,在施氮量相同的情况下,T5 处理较 T2 处理增幅为 77.50%,T4 处理较 T2、T5 处理增幅为 85.98%和 4.79%。由此可知,在施肥时,适当的氮磷钾比可以促进肥料在土壤中发生化学反应,同时证实了杜建军等^[22]的结论,化肥特征存在差异时,与土壤的作用也不尽相同,导致其施入土壤后的迁移规律不同,流失量也存在明显差异。

表 3 柑橘园土壤氮磷淋失形态特征

施肥处理	TN 淋失量/ (kg·hm ⁻²)	NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N		TP 淋失量/ (kg·hm ⁻²)
		淋失量/ (kg·hm ⁻²)	占总氮/ %	淋失量/ (kg·hm ⁻²)	占总氮/ %	
T0	11.64a	4.41a	37.89	0.13a	1.09	0.22a
T1	17.48b	7.17b	41.02	0.31b	1.78	0.22a
T2	20.27c	9.36c	46.18	0.42c	2.05	0.23a
T3	28.13d	11.21d	39.86	0.53d	1.87	0.22a
T4	37.70e	13.11e	34.76	0.43c	1.15	1.01c
T5	35.98e	10.69d	29.72	0.44c	1.21	0.53b

在 T0~T3 处理下的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 淋失量顺序与 TN 相同,皆为 T3>T2>T1>T0,且存在显著性差异;在 T2、T4 和 T5 处理下,NO₃⁻-N 的淋失量顺序与 TN 相同,为 T4>T5>T2,且三者间的差异同样达到显著性水平,而 NH₄⁺-N 的淋失量顺序,为 T5>T4>T2,不存在显著性差异。由此可见,NH₄⁺-N 淋失受施肥种类影响,但相对于 NO₃⁻-N 和 TN,NH₄⁺-N 受影响较小,土壤中 NO₃⁻-N 淋失受施肥种类影响最大。

由表 2 可知,在不同施肥处理下,1.09%~2.05%以 NH₄⁺-N 形式流失,29.72%~46.18%以 NO₃⁻-N 形式流失,尽管 NO₃⁻-N 淋失量远大于 NH₄⁺-N,但与目前大多数的研究结果相比,NO₃⁻-N 的比重与其他学者的试验结果相比差异较大。李双喜等^[23]研究表明,施加三元复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)后,NO₃⁻-N 占总氮的比例超过 90%,NH₄⁺-N 比例仅为 1.7%~5.6%,NO₃⁻-N 为氮素淋失的主要形态。孙军益^[24]研究表明,施加尿素后,NO₃⁻-N 所占总氮比例为 59.7%~73.4%。出现这样的差异,可能是因为施肥日期与淋溶试验日期相隔时间较长,试验过程周期长,肥料完全溶解于土壤中,与水和氧气充分结合,从有机态氮分解为无机态氮。而在本试验中,施肥日期距离试验日期较短,肥料中的氮素没有完全溶解,随着降水事件的进行,氮素以有机氮的形态直接淋溶流失。其次,试验中的土壤性质、土层厚度、施肥种类和施肥时间都对试验结果产生了一定影响。

在本淋溶试验中,TP淋失量的顺序为 $T4 > T5 > T2 = T0 = T3$,且 $T4$ 和 $T5$ 处理与 $T0 \sim T3$ 处理皆存在显著性差异。其中, $T4$ 处理较 $T5$ 处理施磷量的增幅是 80%, $T4$ 处理较 $T5$ 处理 TP 淋失量增幅 89.27%。孙军益等^[24] 和马金奉等^[25] 研究表明,磷肥的施加量对淋滤液中 TP 的含量有显著影响,但磷素淋失量随施磷量增加而上涨的幅度均有不同。不同种类的磷肥施入土壤后,在土壤中发生的化学反应和反应速率皆有不同,受到土壤的吸附作用力也存在差异,淋失量也不尽相同,但关于具体的影响因素,还需要做进一步的研究。

3 结论

(1)在淋溶试验过程中,氮磷淋溶浓度随淋滤液增加的变化趋势,整体呈现单峰曲线形式。从整个淋溶试验来看,淋滤液中 TN 、 TP 、 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 的淋溶浓度范围分别为 37.16~163.07, 0.61~6.69, 27.54~79.38, 2.37~7.10 mg/L, 主要与土壤理化性质、肥料种类与施肥量以及 NO_3^- 、 NH_4^+ 离子的特性有关。

(2)对比土壤氮磷在不同施氮量和施磷量下的淋失规律,可以看出施肥量是影响氮素和磷素淋失量的重要因素。施肥量的增加,会导致土壤淋滤液中氮磷的淋溶浓度和淋失量显著升高。且施肥种类对氮素之间的转化过程和土壤中的垂直移动过程同样有着重要影响。本次淋溶试验中,在土壤淋滤液里的可溶性氮中,以 $NO_3^- - N$ 为主,其淋失量占 TN 淋失量的比率为 29.72%~46.18%, $NH_4^+ - N$ 淋失量的比重为 1.09%~2.05%。影响 $NO_3^- - N$ 和 $NH_4^+ - N$ 在土壤中转化过程的其他因素仍需进一步研究。

通过本试验对三峡库区柑橘园土壤中氮磷淋溶规律的研究结果,为三峡库区农业面源污染的防控提供了参考依据,为三峡库区农业合理施肥的发展方向提供了帮助,对三峡库区水环境安全有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 曾立雄,肖文发,黄志霖,等. 三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J]. 环境科学,2013,34(8):3035-3042.
- [2] 王丽婧,郑丙辉,李子成. 三峡库区及上游流域面源污染特征与防治策略[J]. 长江流域资源与环境,2009,18(8):783-788.
- [3] 柴世伟,裴晓梅,张亚雷,等. 农业面源污染及其控制技术[J]. 水土保持学报,2006,20(6):192-195.
- [4] 刘景红,张晟,陈玉成,等. 重庆市水库富营养化调查及评价[J]. 水土保持学报,2005,19(4):131-134.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 中华人民共和国环境保护部,2009.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 中华人民共和国环境保护部,2017.

- [7] 黄丽,项雅玲,袁锦方. 三峡库区农田的化肥面源污染状况研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊 10):362-367.
- [8] 汪祥,李晓玲,张敏,等. 三峡库区秭归县农业面源污染原因及发展可持续生态农业的策略[J]. 农业科技通讯,2008(12):98-100.
- [9] 湛芸,何丙辉,赵秀兰,等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(4):31-34.
- [10] McDowell R W, Sharpley A N. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, 102(1): 17-27.
- [11] 霍洪江,汪涛,魏世强,等. 三峡库区紫色土坡耕地氮素流失特征及其坡度的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),2013,35(11):112-117.
- [12] 黄利玲,王子芳,高明,等. 三峡库区紫色土旱坡地不同坡度土壤磷素流失特征研究[J]. 水土保持学报,2011,25(1):30-33.
- [13] 曾立雄,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学,2012,33(10):3390-3396.
- [14] 吴东,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. 环境科学,2015,36(10):3825-3831.
- [15] 赵建博. 香溪河流域坡耕地土壤氮磷淋溶流失模拟研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.
- [16] 串丽敏,赵同科,安志装,等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报,2010,26(11):200-205.
- [17] 张英鹏,李彦,李景超,等. 连续淋洗对山东省主要土壤磷素有效性及磷库的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(6):21-24.
- [18] 李同杰,刘晶晶,刘春生,等. 磷在棕壤中淋溶迁移特征研究[J]. 水土保持学报,2006,20(4):35-39.
- [19] 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.
- [20] Ulén B, Jakobsson C. Critical evaluation of measures to mitigate phosphorus losses from agricultural land to surface waters in Sweden [J]. Science of the Total Environment, 2005, 344(1/3): 37-50.
- [21] Dise N B, Matzner E, Forsius M. Evaluation of organic horizon C : N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe [J]. Environmental Pollution, 1998, 102(1): 453-456.
- [22] 杜建军,毋永龙,田吉林,等. 控/缓释肥料减少氮挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报,2007,21(2):49-52.
- [23] 李双喜,袁大伟,郑宪清,等. 崇明岛典型果园氮素渗漏流失研究[J]. 江苏农业学报,2012,28(4):771-776.
- [24] 孙军益. 三峡库区紫色土氮磷淋溶试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [25] 马金奉,朱昌雄,李红娜,等. 模拟条件下生物腐殖酸肥对土壤磷素淋失及流失的影响[J]. 中国农业气象,2017(11):699-708.