环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2019

Vol.40 No.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响

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, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 湖北省秭归县林业局, 宜昌 443631)

摘要: 本试验以三峡库区秭归县生态站所在流域内的柑橘园土壤作为研究对象, 通过0~20、0~40、0~60 cm深度的原状土柱淋溶试验对不同施肥量对柑橘园土壤中氮素淋失及残留量的影响进行研究. 试验中设置4种施肥处理, 为不施肥处理(CK)、低氮施肥处理(T1:250 kg·hm^{-2})、中氮施肥处理(T2:500 kg·hm^{-2})、高氮施肥处理(T3:750 kg·hm^{-2}). 结果表明: ①柑橘园土壤中氮素淋失的主要形态为硝态氮(NO_3^--N), 占总氮(TN)淋失量的36.93%~60.07%, 铵态氮(NH_4^+-N)的比例为4.40%~5.79%. 土壤中NO_3^--N残留量占TN残留量的比例为11.31‰~45.66‰, NH_4^+-N残留量的比例为1.05‰~2.07‰; ②相同深度的柑橘园土壤中, 氮素的淋失量和残留量与施肥量呈显著正相关. 不同施肥量下土壤中TN的淋失量和残留量分别为11.35~30.11 kg·hm^{-2}和0.30~1.86 g·kg^{-1}. 其中, NO_3^--N和NH_4^+-N的淋失量占TN淋失量的比例在T2处理下达到峰值, NO_3^--N和NH_4^+-N的残留量占TN残留量比例峰值分别出现在T1和T2处理; ③相同施肥量下, 土壤中氮素不同形态的淋失量和残留量受土壤深度影响的差异较大. 施肥后, NO_3^--N淋失量和残留量的峰值分别出现在20cm和40 cm深度, NH_4^+-N淋失量和残留量的峰值主要出现在20 cm深度. 从试验中的结果推论, 0~40 cm土柱中的中氮处理更有利于肥料氮向无机态氮转化以供植物吸收并降低施肥后氮素淋失的风险.

关键词: 三峡库区; 柑橘园土壤; 施肥量; 氮; 淋失及残留量
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1468-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201805147

Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area

WANG Tian[1], HUANG Zhi-lin[1*], ZENG Li-xiong[1], XIAO Wen-fa[1], SONG Wen-mei[2]
(1. State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Forestry Bureau of Zigui County, Yichang 443631, China)

Abstract: This experiment has the citrus orchard soil in the basin of the Zigui County Ecological Station in the Three Gorges Reservoir Area as its research object. Leaching tests of an undisturbed soil column at 0-20, 0-40, and 0-60 cm depth were performed in a citrus orchard. The effects of nitrogen leaching and residual amounts in the soil were studied. Four kinds of fertilization treatments were set up in the experiment: no fertilization treatment (CK), low nitrogen fertilization treatment (T1: 250 kg·hm^{-2}), medium nitrogen fertilization treatment (T2: 500 kg·hm^{-2}), and high nitrogen fertilization treatment (T3: 750 kg·hm^{-2}). The results showed that: ① The main form of nitrogen leaching in citrus orchard soil was nitrate nitrogen (NO_3^--N), accounting for 36.93%-60.07% of total nitrogen (TN) leaching. The ratio of TN to ammonium nitrogen (NH_4^+-N) was 4.40% to 5.79%. The ratio of NO_3^--N residues in soil to TN residues was 11.31‰-45.66‰, and the ratio of NH_4^+-N residues to TN residues was 1.051‰-2.07‰. ②Nitrogen leaching and residual amounts in citrus orchards at the same depth showed significant positive correlation with the amount of fertilizer applied. The leaching losses and residual amounts of TN in soil at different fertilization rates were 11.35-30.11 kg·hm^{-2} and 0.30-1.86 g·kg^{-1}, respectively. Among them, the ratio of leaching losses of NO_3^--N and NH_4^+-N to TN leaching amounts peaked under T2 treatment, and the peaks of NO_3^--N and NH_4^+-N residues in TN residual amounts appeared in T1 and T2 treatment, respectively. ③ Given the same fertilization amounts, the leaching amounts and residual amounts of different forms of nitrogen in the soil were greatly affected by soil depth. After fertilization, the peaks of NO_3^--N leaching and residual amounts appeared at 20 cm and 40 cm, respectively, and the peaks of NH_4^+-N leaching and residual amounts mainly appeared at 20 cm depth. Inferred from the results of the experiment, the neutral nitrogen treatment in the 0-40 cm soil column is more conducive to the conversion of fertilizer nitrogen to inorganic nitrogen for plant absorption, and reduces the risk of nitrogen leaching after fertilization.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; citrus orchard soil; fertilization; nitrogen; leaching and residual amounts

三峡库区自三峡工程蓄水以后, 库区生境敏感性逐渐提高, 加上过高的移民压力和不科学的农业活动, 以及库区土质较弱的保水保肥能力, 使得大量化肥从土壤中流失, 从中国环境监测总站对三峡库区的统计资料中得知, 仅2016年库区的化肥流失量为1.06万t, 占所施化肥量的8.87%, 大量的氮磷养分通过地表径流和淋溶途径进入库区水体, 导致库区水体出现富营养化现象[1~4]. 因此农业面

收稿日期: 2018-05-17; **修订日期**: 2018-07-24
作者简介: 王甜(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用及其生态环境效应, E-mail:1494951212@qq.com
* 通信作者, E-mail:hzlin66@163.com

源污染已经成为三峡库区亟待解决的首要研究问题. 到目前为止，国内学者通过室内模拟、室外监测和模型等方法对农业面源污染展开了大量的研究[5~7]，研究显示过量施用化肥已经成为了农业面源污染的主要原因之一[8,9].

柑橘作为三峡库区的主要支柱产业之一，到2016 年为止，占三峡库区农用地面积的35.84%[4]. 在对三峡库区进行的农事调查中发现，当地农户因盲目追求高产出、高收益导致柑橘园的管理过程中存在不科学施肥行为. 过量施用的化肥不仅使得土壤有机质和全氮、全磷、可溶性氮的含量大幅度增加，加大了氮磷淋失的风险，还造成了肥料的浪费，加速了柑橘园土壤的酸化过程，是库区土壤退化和水体富营养化的主要原因之一[10~12]. 有鉴于此，许多学者通过调整施肥量、施肥种类或施肥方式等方法来控制土壤氮磷的流失[13~17]，但目前的研究多集中于水稻、玉米等粮食作物[16~18]，对柑橘园土壤氮素受施肥量影响的研究较少. 因此本文以三峡库区柑橘园土壤作为研究对象，通过原状土柱模拟试验对不同施肥处理下土壤氮的淋失量和残留量进行分析，探讨施肥量对三峡库区柑橘园土壤养分在垂直方向上变化的影响，寻求柑橘园合理的施肥和管理方式，减量施肥对养分的流失有辅助作用. 从本试验中得到的三峡库区柑橘园土壤氮淋失及残留量的研究结果，可为三峡库区农业面源污染的防控提供参考依据，为三峡库区农业合理施肥的发展方向提供帮助，这对三峡库区水环境安全有着重要的意义.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地位于湖北省秭归县茅坪镇三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站，地理位置为110°18′36″E，30°37′52″N，地处三峡库区西陵峡地段，是湖北省著名的柑橘种植区. 秭归县内地势西高东低，属于典型的亚热带大陆性季风气候，全年日照时数1 200 ~ 1 600 h，年平均气温 7.8 ~ 18℃，无霜期 205 ~ 306 d，年平均降水量在 950 ~ 1 900 mm之间且降雨时空分布不均，多集中在5 ~ 9月，空气相对湿度 72%[18]. 研究地所在柑橘园的土壤类型是从砂页岩发育而来的黄壤，土壤质地为沙壤土，孔隙度大、入渗能力强，部分理化性质见表1.

表1　土壤基本理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of the soil tested

土地利用类型	海拔/m	土壤	深度/cm	TN/g·kg^{-1}	有机质/g·kg^{-1}	NH_4^+-N/g·kg^{-1}	NO_3^--N/mg·kg^{-1}	含水率/%	土壤容重/g·cm^{-3}
柑橘园	275	黄壤土	20	1.36	7.1	4.22	0.16	15.69	1.58
			40	1.51	5.78	8.81	0.14	14.53	1.41
			60	1.64	4.17	6.70	0.15	13.58	1.35

1.2　研究方法

1.2.1　试验装置

本试验所用的自制简易试验装置主体由壁厚0.5 cm，直径 20 cm 的 PVC 管制成，土柱分为四段，从下往上依次为砂石过滤段(5 cm)，原状土柱段(20、40、60 cm)、肥料混合段(5 cm)和淋洗超高段(10 cm).

本试验开始前，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两层纱布，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一层纱布，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，装置安装示意如图 1 所示. 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.

1.2.2　试验设计

在试验前期对研究区农户的农事活动进行调查后可知，柑橘园所施用的化肥量普遍过高，根据农户的施肥习惯，本试验按照施氮量设置 4 个施肥处理，分别为：不施肥处理(CK)、低氮施肥处理(T1：250 kg·hm^{-2})、中氮施肥处理(T2：500 kg·hm^{-2})、高氮施肥处理(T3：750 kg·hm^{-2})，每个施肥处理设置 3 个重复，肥料品种为尿素. 中氮施肥处理的施肥量与试验区农户在柑橘园所施用化肥量相近. 试验期间土壤平均温度为22℃. 在原状土柱中施加肥料后静置 24 h，利用设施向原状土柱内加入纯水. 从秭归县定位站多年收集到的雨季降雨数据进行计

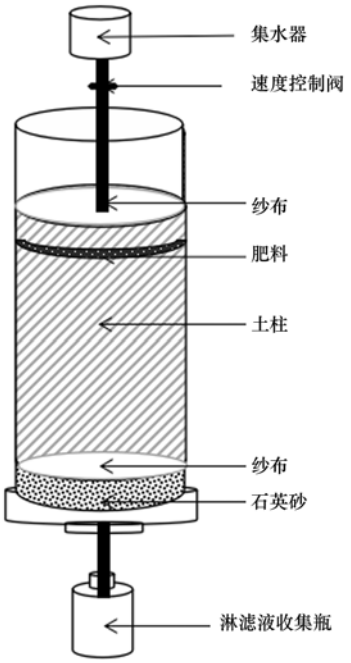

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Sketch of the test device

算后得知，秭归县雨季次平均降雨量为 32.3 mm，次平均降雨强度为 3.94 mm·h^{-1}，换算到每根原状土柱约为1 014 mL纯水，为试验方便，本试验中每次在 8 h 内匀速向柱内加入1 000 mL 纯水，当土壤淋滤液每次出流到 100 mL 时采集一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.

1.3 样品测定与数据处理

土壤淋滤液的监测指标主要为：总氮（TN）、铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）. 其中，利用上海精科仪器有限公司生产的紫外线分光光度计对淋滤液中的 TN 进行测定，可溶性氮中的 NH_4^+-N、NO_3^--N利用意大利 AMS/Westco 科学仪器公司产 Smartchem140 型化学间断分析仪进行测定.

土壤理化性质测定：土壤风干后过筛用 5% 的 KCl 溶液浸提，5∶1水土比，振荡后静置，取上清液用与土壤淋滤液相同方法对 TN、NH_4^+-N和NO_3^--N 进行测定[19].

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对试验数据进行处理与分析，采用 SPSS 22.0 对不同氮添加处理进行单因素方差分析（ANOVA），氮添加量为主要影响因子，显著性水平为 0.05，其后多重比较为 Turkey HSD 法，采用 Microsoft Excel 2010 和 Origin9.0 软件进行图表制作.

2 结果与分析

2.1 施肥量对土壤氮淋失的影响

由图 2 可知，TN、NO_3^--N和NH_4^+-N淋溶浓度的变化与施肥量和土壤深度相关. 淋溶试验期间，不同施肥处理下 20、40 和 60 cm 土柱土壤淋滤液中 TN 的淋溶浓度范围分别为 56.76 ~ 169.67 mg·L^{-1}（平均值为 75.08 ~ 113.53 mg·L^{-1}）、48.71 ~ 156.08 mg·L^{-1}（平均值为 73.81 ~ 117.29 mg·L^{-1}）和 37.16 ~ 153.07 mg·L^{-1}（平均值为 53.54 ~ 139.425 mg·L^{-1}）；NO_3^--N淋溶浓度分别为 24.64 ~ 80.26 mg·L^{-1}（平均值为 27.89 ~ 65.31 mg·L^{-1}）、29.01 ~ 69.62 mg·L^{-1}（平均值为 33.50 ~ 57.99 mg·L^{-1}）和 27.54 ~ 71.38 mg·L^{-1}（平均值为 30.29 ~ 61.61 mg·L^{-1}），NH_4^+-N淋溶浓度分别为 3.12 ~

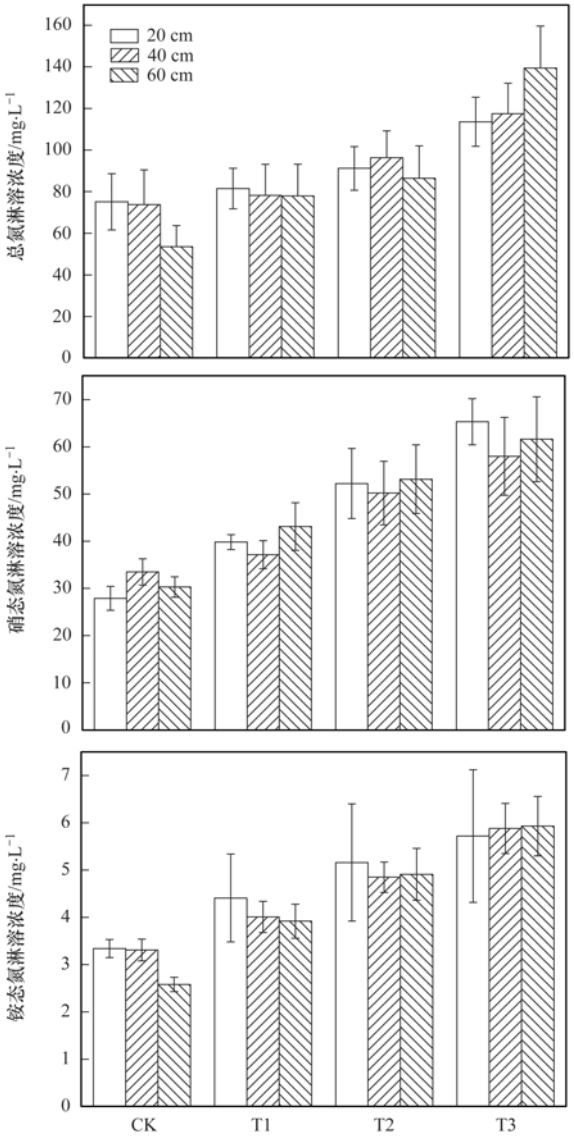

图 2 不同施肥量土柱淋溶液中氮的平均浓度

Fig. 2 Average concentration of nitrogen at different depths of soil columns at different fertilization rates

7.25 mg·L^{-1}(平均值为3.34～5.72 mg·L^{-1})、2.88～7.17 mg·L^{-1}(平均值为3.31～5.88 mg·L^{-1})和2.37～7.08 mg·L^{-1}(平均值为2.58～5.93 mg·L^{-1}).

对所有施肥处理在20、40和60 cm土柱淋滤液中测得的试验结果进行差异性统计分析，并结合图2，可知同种深度土柱土壤淋滤液中TN、NO_3^--N和NH_4^+-N的淋溶浓度皆随施肥量的增加而显著增加. 其中，土柱淋滤液中TN淋溶浓度在CK和T1处理间均无显著性差异($P>0.05$)，随着施肥量的增加，淋溶浓度显著增加($P<0.05$). 与CK处理相比，T1、T2和T3施肥处理下TN淋溶浓度的上升幅度分别在20 cm为8.51%、21.4%和51.28%；40 cm为5.87%、30.47%和59.12%；60 cm土柱为45.61%、61.36%和160.40%. 结果表明，施肥量是影响TN淋溶的主要因素，且施肥量超出一定值后TN淋溶浓度会大幅度上升. 其次土壤深度对TN淋溶浓度的分布也有影响，呈现先降低后上升的趋势. NO_3^--N在20 cm和60 cm土柱淋滤液中的淋溶浓度均随施肥量的增加而显著增加($P<0.05$)，在40 cm土柱淋滤液中，只有T1和T2处理下的淋溶浓度存在明显差异.

相对于CK，3种施肥处理下NO_3^--N的上升幅度分别为42.74%、87.31%和134.17%；40 cm为10.93%、49.85%和73.10%；60 cm土柱为42.40%、75.50%和103.40%. 相对于TN，NO_3^--N受施肥量影响更大，且在20 cm深度淋溶浓度变化差异最为显著. NH_4^+-N在60 cm土柱淋滤液中的淋溶浓度随施肥量增加而显著增加($P<0.05$)，且上升幅度最大，为51.94%、90.231%和129.84%；40 cm土柱淋滤液中，NH_4^+-N的淋溶浓度在T1和T2处理间无显著性差异($P>0.05$)，浓度上升幅度为21.15%、46.52%和77.64%；20 cm土柱淋滤液中，NH_4^+-N的淋溶浓度在T2和T3处理间无显著性差异($P>0.05$)，浓度上升幅度为32.03%、54.49%和71.26%.

2.2　施肥量对氮淋失量及流失率的影响

结合表2和图3可以发现，在3种深度的土柱中，随着施肥量的增加，土壤淋滤液中TN和NH_4^+-N的淋失量显著增加($P<0.05$)，NO_3^--N的淋失量在施肥量达到高氮处理时明显降低，同时TN淋失量占施肥的比例随施肥量的增加而显著下降. NO_3^--N淋失量占TN淋失量的比例为36.93%～60.07%，NH_4^+-N的比例为4.40%～5.79%，可以看出NO_3^--N是土壤氮素淋溶流失的主要形态. 从图2中得知，随施肥量的增加，NO_3^--N淋失量占TN的比例变化趋势呈现出单峰曲线. 对比3种深度的NO_3^--N淋失量比例发现，20 cm土柱受施肥量的影响最为明显，随施肥量增加而上涨的幅度为11.78%、8.40%和－0.19%；在40 cm土柱中，

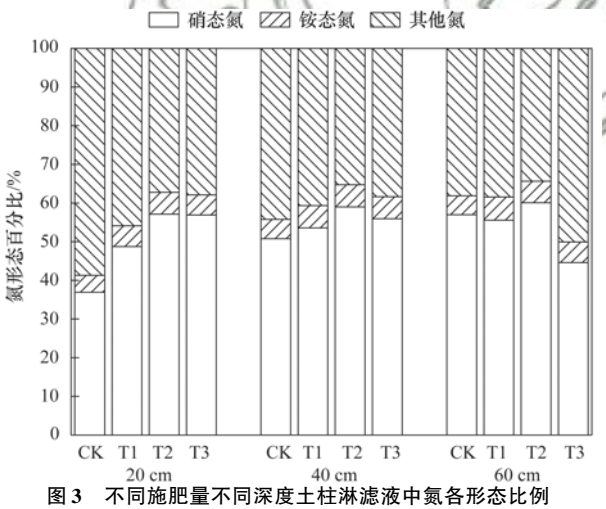

图3　不同施肥量不同深度土柱淋滤液中氮各形态比例

Fig. 3　Ratios of different forms of nitrogen at different depths of soil columns at different fertilization rates

表2　不同施肥量下不同深度土柱氮淋失量1)

Table 2　Leaching amount of nitrogen at different depths of soil columns at different fertilization rates

深度/cm	施肥处理	TN淋失量/kg·hm^{-2}	NO_3^--N淋失量/kg·hm^{-2}	NH_4^+-N淋失量/kg·hm^{-2}	氮素淋失量占施肥量的比例/%
20	CK	20.66a	7.63a	0.91a	
	T1	22.95a	11.18b	1.24a	9.18
	T2	25.3b	14.45c	1.43b	5.06
	T3	30.11c	17.14d	1.56b	4.02
40	CK	17.96a	9.12a	0.9a	
	T1	19.16a	10.26b	1.11a	7.66
	T2	22.94b	13.53c	1.32b	4.59
	T3	28.15c	15.75d	1.61c	3.75
60	CK	11.35a	6.47a	0.55a	
	T1	16.99b	9.27a	0.85b	6.8
	T2	18.91c	11.36b	1.05c	3.9
	T3	29.03d	12.96c	1.24d	3.87

1)同一列中不同小写字母表示不同施肥量间差异显著($P<0.05$)，下同

NO_3^--N的淋失量比例上涨幅度为 2.77%、5.43%、−3.03%；在 60 cm 土柱中，NO_3^--N的淋失量比例上涨幅度为 −2.44%、5.51%，−15.43%. NH_4^+-N的淋失率在 20 cm 和 60 cm 土柱中都是在 T2 处理达到最高值，在 40 cm 土柱中是在 T1 处理达到最高值. 可见施肥量过高会抑制NO_3^--N和NH_4^+-N的转化.

2.3 施肥量对土壤氮残留量的影响

淋溶试验结束后，3 种深度土柱土壤中 TN、NO_3^--N和NH_4^+-N的残留量如表 3 所示. 从中得知，施肥量对土壤中氮的残留量有着显著的影响. 其中 TN 的残留量随施肥量的增加而显著增加，对比 T1 和 T2 处理，TN 残留量的涨幅为 75.86% ~ 135.56%，对比 T2 和 T3 处理，TN 残留量的涨幅为 69.61% ~ 177.78%. NO_3^--N的残留量随施肥量的增加呈单峰曲线状，在 T2 处理时达到残留量最大值，NO_3^--N残留量占 TN 残留量的比例随施肥量的增加而减少. 在 20 cm 土柱中NH_4^+-N残留量随施肥量的增加涨幅最大，40 cm 和 60 cm 土柱在 CK 处理下的NH_4^+-N残留量高于 T1 处理下的残留量，NH_4^+-N残留量占 TN 残留量的比例随施肥量的增加呈单峰曲线状. 对比 3 种深度的土柱土壤中氮素的残留量得知，在 CK 和 T1 施肥处理下，土壤 TN 的残留量随土柱深度增加而增加，在 T2 和 T3 施肥下，20 cm 土柱土壤中 TN 残留量最高，40 cm 土柱中最低；NH_4^+-N与 TN 相似，CK 处理下的残留量随土柱深度增加而增加，但施肥后的残留量随深度增加而减少；NO_3^--N在 T3 处理下的残留量随土柱深度的增加而降低，CK、T1 和 T2 处理下NO_3^--N残留量呈现单峰曲线状，在 40 cm 土柱达到峰值.

表 3 不同施肥量下不同深度土柱氮肥残留量[1)]

Table 3 Nitrogen residue in soil columns at different depths and different fertilization rates

土柱深度 /cm	施肥处理	TN /g·kg^{-1}	NO_3^--N /mg·kg^{-1}	NO_3^--N残留量比例/‰	NH_4^+-N /mg·kg^{-1}	NH_4^+-N残留量比例/‰
20	CK	0.30 a	11.85 a	39.50	0.46a	1.53
	T1	0.45 a	16.58 b	36.84	0.63 a	1.40
	T2	1.06 b	34.70d	32.74	2.19 b	2.07
	T3	1.86 c	26.98c	14.51	3.59 c	1.93
40	CK	0.40 a	12.27a	30.68	0.78 a	1.95
	T1	0.53 a	24.20 b	45.66	0.61 a	1.15
	T2	0.98 b	42.09d	42.95	1.94 b	1.98
	T3	1.70 c	22.88c	13.46	2.82 c	1.66
60	CK	0.41 a	8.86a	21.61	0.82 a	2.00
	T1	0.58 a	21.52 b	37.10	0.61 a	1.05
	T2	1.02 b	37.79c	37.05	1.84 b	1.80
	T3	1.73 c	19.57 b	11.31	2.66 c	1.54

3 讨论

在淋溶试验过程中，氮肥进入土壤与水发生反应，生成铵盐，在土壤微生物的氧化作用下，生成硝酸盐. 其中，未被作物吸收的铵盐和硝酸盐，一部分随地表径流和土壤淋溶等多种途径进入周边受纳水体[20~22]，形成农业面源污染，另一部分富集于土壤中，对土壤、作物产生负面影响的同时也成为地下水污染的潜在来源[23,24]. 因此想要对三峡库区农业面源污染进行防控工作，从土壤氮素流失和残留两个方向进行研究.

从本试验结果得知，NO_3^--N是氮素淋失的主要形态，其淋失量占 TN 淋失量比例基本超过 50%，NH_4^+-N淋失量比例为 4.27% ~ 5.79%，且施肥量是影响NO_3^--N和NH_4^+-N淋失量的主要因素. 国内很多学者所进行的试验都证明了这一结论，其中张敏等[25]在太湖地区水稻田进行的淋溶试验中无机态氮比例与本研究接近，为 41.1% ~ 59.5%，如吴家森等[13]在浙江临安雷竹林所进行的试验，NO_3^--N占总氮的比例范围为 75.7% ~ 83.6%，而陈维梁等[2]在四川绵阳市紫色土坡耕地进行的试验中，所测得的NO_3^--N比重峰值可高达 93.65%. 可能因为张敏等人的试验选取的土层厚度、施肥量和施肥种类与本研究接近，因此NO_3^--N所占比重相近；吴家森等[13]的研究中土层厚度为 30 cm，施肥量接近，但施肥种类为复合肥、缓释肥和微生物肥，与尿素相比更易于与水产生化学反应，产生硝化作用；陈维梁等[2]的试验同样位于三峡库区，土层厚度相同，但灌溉方式为自然降雨中的暴雨和中雨，单次的灌溉量和灌溉强度都较高，因此无机态氮的比重与同类型试验结果相比较高. 综上所述，土壤中氮素淋失是多重因素综合作用的结果，不仅受施肥量和土层厚度的影响，施肥种类、灌溉量和灌溉强度(降雨量和降雨强度)等因素都会对其产生影响.

土壤氮素残留量中，无机态氮所占比例极小，与氮素淋失量相同的是，NO_3^--N和NH_4^+-N残留量占TN残留量的比例是在40 cm土柱中比重最大. 这与胡明芳等[26]和戴腾飞等[27]的试验结论相似，都认为NO_3^--N和NH_4^+-N主要分布在0～40 cm土层，并且其在土壤中的含量随施肥量增加或土层厚度的增加呈现先增加后降低的趋势，施肥量过高会抑制氮的转化过程. 但胡明芳和戴腾飞都是在滴灌施肥方式下获得以上结论，在戴腾飞等[27]试验中的沟施处理和王虎等[28]的大田试验中所得到的研究结论则是NO_3^--N主要分布在0～20 cm土层，与本研究结果存在差异. 在南镇武等[29]的试验中，土壤中NO_3^--N和NH_4^+-N的积累量在不同施肥处理下其显著增加量为112%～396%和69%～259%，其最大值远高于本试验结果，可能因为南镇武等的试验为长期施肥试验，较长的试验周期使得土壤中的氮素转化成无机态氮. 因此，在氮肥施入土壤后，其迁移转化过程受时间、土壤类型、施肥深度、土壤性质(土壤含水率、pH、温度和湿度)等因素影响，因此施肥方式、施肥种类和灌溉方式等都会对土壤中氮素的分布产生影响，但本研究受条件所限，采取的是常规灌溉和表施方式，未对其他施肥处理进行更进一步的对照研究.

4　结论

(1)在相同深度的柑橘园土壤中，其氮素的淋失量和残留量与施肥量呈显著正相关. 其中，T3处理下，TN和NH_4^+-N的淋失量、残留量的变化幅度最大，在T2处理下，NO_3^--N的淋失量、残留量的变化幅度最大.

(2)在相同施肥量下，柑橘园不同深度土壤中氮素淋失量、残留量的变化趋势存在较大差异. 在CK、T1和T2处理下，TN和NH_4^+-N的淋失量与土柱深度呈负相关；在T3处理下，TN淋失量最大值在20 cm土柱中，NH_4^+-N淋失量最大值在40 cm土柱中. 在4个施肥处理下，NO_3^--N淋失量的最大值皆出现在40 cm土柱中. 施肥后，土壤中TN残留量最小值主要出现在40 cm土柱中，NH_4^+-N残留量最小值主要出现在60 cm土柱中，NO_3^--N残留量最大值主要出现在40 cm土柱中.

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.
Zeng L X, Xiao W F, Huang Z L, *et al*. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi watershed in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3035-3042.

[2] 陈维梁，高扬，林勇明，等. 紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应[J]. 环境科学，2014，**35**(6)：2129-2138.
Chen W L, Gao Y, Lin Y M, *et al*. Nitrogen leaching and associated environmental health effect in sloping cropland of purple soil[J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2129-2138.

[3] 赵欣. 浅析我国农业面源污染防治研究现状与对策[J]. 中国农学通报，2017，**33**(33)：80-84.
Zhao X. Brief analysis of present situation and countermeasures of agricultural non-point source pollution control in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(33): 80-84.

[4] 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]. 北京：中华人民共和国环境保护部，2017.

[5] 谌芸，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)：31-34，43.
Chen Y, He B H, Zhao X L, *et al*. Effect of soil erosion and water loss in farmland on water eutrophication in Xiaojiang River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(4): 31-34, 43.

[6] 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.

[7] 李强坤，李怀恩，胡亚伟，等. 农业非点源污染田间模型及其应用[J]. 环境科学，2009，**30**(12)：3509-3513.
Li Q K, Li H E, Hu Y W, *et al*. Establishment and application of the estimation model for agricultural non-point source pollution in the field[J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3509-3513.

[8] 韩晓飞，高明，谢德体，等. 减磷配施有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应[J]. 环境科学，2016，**37**(7)：2770-2778.
Han X F, Gao M, Xie D T, *et al*. Reduction effect of reduced phosphorus fertilizer and combining organic fertilizers on phosphorus loss of purple soil sloping field[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2770-2778.

[9] 刘志欣. 近十年来重庆三峡库区农业面源污染变化研究[D]. 重庆：重庆师范大学，2016.
Liu Z X. Changes of agricultural non-point source pollution in Chongqing Three Gorges Reservoir Area in recent ten years[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2016.

[10] 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.
Sun J Y. Research in nitrogen and phosphorus leaching in Three Gorges Reservoir Region [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[11] 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，2008，**28**(9)：1832-1838.
Li X P, Sun Y, Shi X J. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on groundwater in purple paddy soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(9): 1832-1838.

[12] 唐平，叶荣生，商要凤，等. 重庆三峡库区柑橘园土壤酸碱度及有效氮磷钾的含量特征[J]. 贵州农业科学，2016，**44**(3)：96-98，105.
Tang P, Ye R S, Shang Y F, *et al*. Characteristics of soil pH and available NPK contents of Citrus Orchards in Chongqing Sanxia Reservoir Area[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2016, **44**(3): 96-98, 105.

[13] 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)：33-37，44.

Wu J S, Chen W, Jiang P K, *et al*. Effects of different fertilization on seepage loses of nitrogen and phosphorus in the soil under phyllostacys praecox stand[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(2): 33-37, 44.

[14] 刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 等. 不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 3083-3090.
Liu X Y, Zou J D, Xu L L, *et al*. Effects of different fertilizer species on carbon and nitrogen leaching in a reddish paddy soil [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 3083-3090.

[15] 周明华, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡耕地磷素流失特征及施肥方式的影响[J]. 水利学报, 2010, **41**(11): 1374-1381.
Zhou M H, Zhu B, Wang T, *et al*. Phosphorus losses and effects of fertilization on sloping cropland of purple soil [J]. Shuili Xuebao, 2010, **41**(11): 1374-1381.

[16] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, **21**(2): 326-335.
Xi B, Zhai L M, Liu S, *et al*. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching [J]. Journal of Plant Nurtrition and Fertilizer, 2015, **21**(2): 326-335.

[17] 彭佩钦, 仇少君, 刘强, 等. 洞庭湖平原典型水稻土氮素固持动态及氮的残留形态[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1139-1145.
Peng P Q, Qiu S J, Liu Q, *et al*. Dynamics of labeled Substrate N by microorganism and soil clay immobilized and its residue fractions in typical paddy soils in Dongting Lake floodplain[J]. Environmental Science, 2009, **30**(4): 1139-1145.

[18] 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.
Zeng L X, Huang Z L, Xiao W F, *et al*. Nitrogen and phosphorus loss in different land use types and its response to environmental factors in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3390-3396.

[19] 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.
Wu D, Huang Z L, Xiao W F, *et al*. Control of soil nutrient loss of typical reforestation patterns along the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3825-3831.

[20] 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.

[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] 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.

[23] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(7): 103-110.
Shang F Z, Yang P L, Li Y K, *et al*. Effects of different chemical nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, **28**(7): 103-110.

[24] 朱波, 汪涛, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(3): 525-533.
Zhu B, Wang T, Kuang F H, *et al*. Characteristics of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(3): 525-533.

[25] 张敏, 赵淼, 田玉华, 等. 太湖地区高产高效措施下水稻氮淋溶和径流损失的研究[J]. 土壤, 2018, **50**(1): 35-42.
Zhang M, Zhao M, Tian Y H, *et al*. Study on N leaching and runoff under integrated high yield and high efficiency practices in paddy fields of Taihu Lake Region[J]. Soil, 2018, **50**(1): 35-42.

[26] 胡明芳, 田长彦, 吕昭智, 等. 氮肥施用量对新疆棉花产量及植株和土壤中硝态氮含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(4): 63-68.
Hu M F, Tian C Y, Lv Z Z, *et al*. Effects of N rate on cotton yield and nitrate-N concentration in plant tissue and soil[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, **34**(4): 63-68.

[27] 戴腾飞, 席本野, 闫小莉, 等. 施肥方式和施氮量对欧美108杨人工林土壤氮素垂向运移的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(6): 1641-1648.
Dai P F, Xi B Y, Yan X, *et al*. Effects of fertilization method and nitrogen application rate on soil nitrogen vertical migration in a *Populus* × *euramericana* cv. 'Guariento' plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(6): 1641-1648.

[28] 王虎, 王旭东, 赵世伟. 滴灌施肥条件下土壤水分和硝态氮的分布规律[J]. 西北农业学报, 2008, **17**(6): 309-314.
Wang H, Wang X D, Zhao S W. Distribution of soil water and nitrate in Lou soil under drip fertigation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2008, **17**(6): 309-314.

[29] 南镇武, 刘树堂, 袁铭章, 等. 长期定位施肥土壤硝态氮和铵态氮积累特征及其与玉米产量的关系[J]. 华北农学报, 2016, **31**(2): 176-181.
Nan Z W, Liu S T, Yuan M Z, *et al*. Characteristics of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen accumulation in soil and its relationship with Maize Yield on long-term located fertilization [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, **31**(2): 176-181.

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

CONTENTS