

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.105



农用肥对三峡库区紫色土小流域氨挥发及氮收支的影响

石小娟, 曹瑞霞, 郭劲松, 刘京, 方芳

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 农业面源氮素已成为影响三峡库区环境安全的主要因素, 但有关农业面源氮污染研究并未深入区分氮污染主要来自何种农业用地, 同时以什么方式进入三峡库区。以三峡库区紫色土农用坡地为研究对象, 对典型农耕模式下碳铵、尿素和复合肥的氨挥发特征以及小流域内氮素收支平衡进行分析, 以期探究氨挥发对三峡库区氮污染的影响。采用原位受控对照实验的范式进行研究, 结果表明, 在典型农耕模式下, 三峡库区紫色土氨挥发速率表现为: 复合肥最低, 变化最平缓; 尿素的峰值出现滞后, 下降缓; 碳铵的峰值出现较早, 下降快。小流域内尿素的氨挥发率为 8.82%~18.37%, 碳铵为 17.86%~30.70%, 复合肥为 2.56%~3.86%。施肥种类的氨挥发率大小为: 碳铵>尿素>复合肥, 典型用地的氨挥发率大小为: 水田>果林>旱地。对流域内氮收支平衡分析, 发现小流域内化肥是氮素最主要的输入, 氨挥发是主要的输出, 土壤氮素残留严重, 增加了氮素流失风险。从环保角度考虑, 降低三峡库区碳铵使用频率、减少旱地和果林施肥量、优化氮肥施用结构是减少氨挥发的有效途径, 氨挥发率的减少对三峡库区氮污染防治具有重要意义。

关键词: 三峡库区; 紫色土; 化肥; 氨挥发; 氮收支

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2019)05-0141-10

Impact of agricultural fertilizer on ammonia volatilization and nitrogen budget of purple soil in Three Gorges Reservoir

Shi Xiaojuan, Cao Ruixia, Guo Jinsong, Liu Jing, Fang Fang

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education;

Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Agricultural non-point source nitrogen has become the main source of environmental safety in the Three Gorges Reservoir. However, investigation on agricultural non-point source nitrogen pollution has not been studied in depth which agricultural land was the main source, and how to enter Three Gorges Reservoir. Purple soil sloping ploughland in Three Gorges Reservoir was taken as the studied object to explore the effect of ammonia volatilization on nitrogen pollution. The ammonia volatilization characteristics of ammonium bicarbonate, urea and compound fertilizer in typical farming modes, and the nitrogen budget in a small watershed were investigated. The study was conducted by using a paradigm of

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(41771520, 41430750)

作者简介: 石小娟(1994-), 女, 主要从事水污染处理研究, E-mail: 20161702080t@cqu.edu.cn.

郭劲松(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: guo0768@cqu.edu.cn.

Received: 2019-01-17

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41771520, 41430750)

Author brief: Shi Xiaojuan (1994-), main research interest: water pollution treatment, E-mail: 20161702080t@cqu.edu.cn.

Guo Jinsong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: guo0768@cqu.edu.cn.

controlled experiments in situ. The results show that the ammonia volatilization flux of compound fertilizer is the lowest and the change is the most gradual. Meanwhile, the peak value of ammonia volatilization flux of urea lags behind and decreases slowly, while that of ammonium bicarbonate appears earlier and decreases faster. The ammonia volatilization loss ratio of urea, ammonium bicarbonate and compound fertilizer in the watershed are 8.82%~18.37%, 17.86%~30.70% and 2.56%~3.86%, respectively. Besides, the ammonia volatilization loss ratio is in order: ammonium bicarbonate > urea > compound fertilizer, and the ammonia volatilization loss ratio between typical land use is in order: paddy field > fruit forest > dry land. Moreover, it is found that chemical fertilizer and ammonia volatilization are the most important nitrogen inputs and outputs in the watershed, and soil nitrogen residues are serious, which increases the risk of nitrogen loss. From the perspective of environmental friendliness, reducing the frequency of ammonium bicarbonate use, reducing the amount of fertilizer applied to dry land and fruit forest, and optimizing the application structure of nitrogen fertilizer in the Three Gorges Reservoir are effective ways to reduce ammonia volatilization. The reduction of ammonia volatilization is of great significance for the prevention and control of nitrogen pollution in the Three Gorges Reservoir.

Keywords: Three Reservoir Region; purple soil; chemical fertilizer; ammonia volatilization; nitrogen budget

三峡水库是长江中下游水环境安全保障的关键区域,农业面源氮污染是影响水环境安全的重要因素之一^[1-3]。库区农耕区域广、垦殖密度高,其中,紫色土耕地面积占了78.7%,紫色土壤土层浅、质地轻、孔隙大、水土流失快、保肥能力差,是库区农业面源氮污染的主要来源^[4-5]。

中国农耕土地氮肥施用量大,但利用率低,其中,1%~47%随着氮挥发进入大气^[6]。进入大气中的氮会以干湿沉降的方式进入三峡生态系统,造成氮污染。崔健等^[7]在江西耕作红壤和黄壤上施用尿素轮作马唐和冬萝卜,发现春季黄壤的氮挥发通量是红壤的11.87倍,且春季高于秋季,其原因在于土壤性质差异。研究表明,氮挥发受肥料(类型、用量、施肥方式)^[8-10]、土壤理化性质(pH、湿度、CaCO₃含量)^[11-12]、气候条件(气温、降雨、光照、风速)^[13]和管理措施(灌溉、耕作)^[14-15]等因素影响。不同地理位置、土壤类型下,氮挥发规律不同。目前,对氮挥发的研究主要集中在红壤、黄壤和黑壤以及南方水稻田、作物蔬菜地和北方旱地等平地上,对于四川盆地低山丘陵区域紫色土壤氮挥发的研究鲜见报道。

系统地研究区域性氮素的输入和输出等收支过程是合理、有效地理解一个区域氮循环的重要手段,也是对其环境效应评价的关键^[16-17]。近年来,研究者针对土壤氮收支做了大量的研究,包括化肥施用、大气沉降、生物固氮等氮输入,以及氮挥发、反硝化、径流淋溶等氮输出^[18-20]。但不同区域人类活动、土地分布、工农业发展等情况的差异,加上一些区域基础数据的缺乏,使得对氮素循环特征及其环境效应

的理解仍不够充分^[21]。故对紫色土坡耕地进行氮收支研究有助于合理施肥,控制氮素流失,保护水体生态环境。

新政小流域位于重庆市忠县石宝镇,是三峡库区心腹区域,其中,紫色土耕地占80%,坡上果林、坡下水田和旱地、坡底水田的土地利用模式在三峡库区具有代表性。本文以新政小流域紫色农用坡地为研究对象,通过野外原位实验研究三峡库区紫色土典型农耕模式下化肥氮的氮挥发特征,以及氮挥发对氮素平衡的影响,以期对三峡库区紫色土氮收支的研究及氮污染的防治提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

选择新政小流域(108°10'E30°25'N)作为研究实验区。小流域属亚热带东南季风气候,四季分明,日照充足,雨量充沛,年均气温19.2℃,降雨量1150mm,无霜期约320d,适宜水稻、小麦、玉米、蔬菜等农作物生长。小流域种植类型主要为坡上果林、坡下旱地和水田、坡底水田,总面积为45.47hm²,其中,果林占55.64%,旱田占24.85%,水田占19.51%。

1.2 实验设计

对新政小流域化肥使用情况调查发现,复合肥、尿素及碳铵是农用肥中主要的氮肥,单季单位面积施用氮肥折纯氮量为225kg/hm²。为了减小不同季节耕作条件和气候条件对实验结果的影响,便于实验观测,实验控制氮肥类型、氮肥用量及施肥时间

相同。

选择果林、旱地和水田各 20 m² 作为小流域典型农耕模式下的实验样地。各实验样地均设置 1 个对照组(不施肥)和 3 个实验组(单施复合肥、尿素、碳铵),每个实验组设置 3 个重复,共 12 个实验样本。其中,尿素、碳铵和复合肥与小流域正常农用肥来源一致,均购于当地市场,含氮量分别为 46.4%、17.1% 和 14.0%。样地编号及具体施用氮肥量见表 1。

表 1 实验设计

Table 1 The experiment design

序号	编号	耕地类型	氮肥类型	折纯氮量/(kg·hm ⁻²)
1	PF00	水田	无	0
2	PF01	水田	尿素	225
3	PF02	水田	碳铵	225
4	PF03	水田	复合肥	225
5	FF00	果林	无	0
6	FF01	果林	尿素	225
7	FF02	果林	碳铵	225
8	FF03	果林	复合肥	225
9	DL00	旱地	无	0
10	DL01	旱地	尿素	225
11	DL02	旱地	碳铵	225
12	DL03	旱地	复合肥	225

1.3 样品采集与分析

1.3.1 氨挥发收集与测定 采用李宗新等^[22]的田间原位通气法收集氨挥发量。氨挥发收集装置如图 1 所示,装置主体由 PVC 硬质塑料管制成,管内径 150 mm,高 120 mm。在塑料管的顶部和距地面 50 mm 的中部放置一块均匀蘸取磷酸甘油溶液的海绵(直径 160 mm、厚度 20 mm),其中,磷酸甘油溶液由磷酸(50 mL)和丙三醇(40 mL)定容至 1 L 配制而成。中部海绵用于吸收土壤氨挥发;顶部海绵则起隔绝外界气体的作用。

施肥后,随即在各实验样地随机放置 3 个氨挥发收集装置。于每天 17:00 对样品进行采集。连续采集一周后,在第 2、3 周,每隔 2 d 或 3 d 采样一次,最终将采样时间间隔延长至 7 d,直至监测不到氨挥发为止。用于隔绝外界气体的海绵,肉眼观察其干湿程度,大约 3~7 d 更换 1 次。将采集的样品密封保存,带回实验室,浸于 300 mL 1 mol/L 的 KCl 溶液中,振荡 1 h,获得浸提液。氨氮浸提液采用纳氏试剂光度法测定(HJ535-2009)。

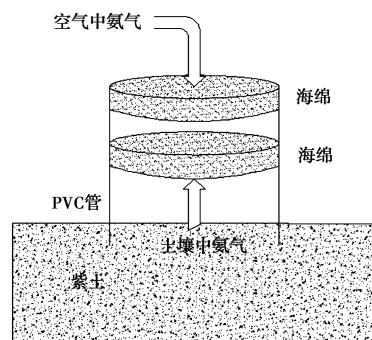


图 1 田间氨挥发捕获器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of in-situ ammonia volatilization collector

1.3.2 计算方法

氨挥发量

$$M = \frac{m}{A} \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中: M 为氨挥发量,kg/hm²; A 为装置横截面积,m²; m 为每个装置测得的氨气量,mg。

氨挥发速率

$$V_t = \frac{M}{D} \quad (2)$$

式中: V_t 为第 t 天氨挥发速率,kg/hm²/d; D 为单次连续捕获时间,d。

氨挥发累积量

$$C_t = \sum_{i=1}^t V_i \quad (3)$$

式中: C_t 为第 t 天氨挥发累积量,kg/hm²。

氨挥发率

$$I = \frac{M_e - M_c}{F} \times 100\% \quad (4)$$

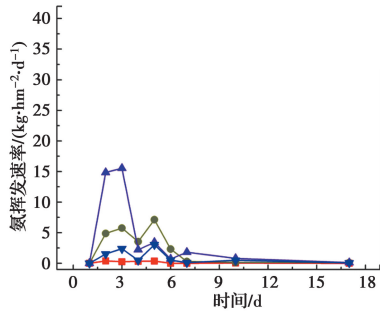
式中: I 为氨挥发率,%; M_e 实验组氨挥发总量,kg/hm²; M_c 空白组氨挥发总量,kg/hm²; F 为施肥折纯氮量,kg/hm²。

1.3.3 数据统计与分析 实验数据采用 Excel2016、SPSS21.0 和 Origin8.0 进行数据分析和绘图。

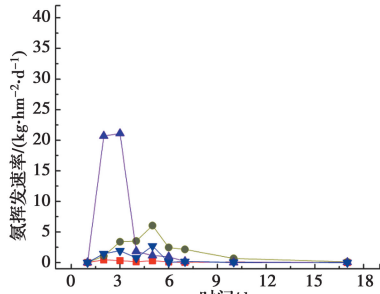
2 结果与分析

2.1 氨挥发速率 V_t

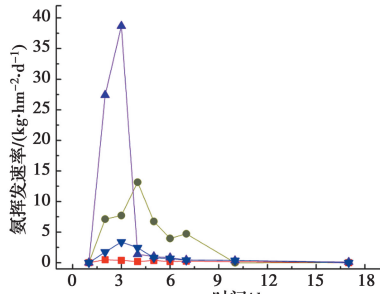
图 2 为不同农耕模式下氨挥发速率,可以看出,氨挥发速率整体呈现先增加后降低的趋势。分析发现,对照组 FF00、DL00 和 PF00 3 组土壤的氨挥发速率均较低,在 0.00~0.49 kg/hm²/d 之间。说明样地耕作残余的氮肥也会产生氨挥发,空白组正是为了修正氨挥发相关数据而设定。



注: — FF00 — FF01 — FF02 — FF03
(a) FF组



注: — DL00 — DL01 — DL02 — DL03
(b) DL组



注: — PF00 — PF01 — PF02 — PF03
(c) PF组

图 2 氨挥发速率

Fig. 2 Ammonia volatilization flux

在施肥后 1~6 d 内,FF01 氨挥发速率出现两个峰值,第 1 个是第 3 d 的小高峰 5.76 kg/hm²/d,第 2 个为第 5 d 的峰值 7.12 kg/hm²/d,6 d 后氨挥发速率低于 0.29 kg/hm²/d,且随着时间的增加而降低。DL01 在施肥后氨挥发速率只出现 1 个峰值,即第 5 d 的峰值 6.07 kg/hm²/d,随即下降。PF01 和 DL01 的变化趋势相似,在施肥后,氨挥发速率迅速增加,并在施肥后的第 4 d 达到峰值 13.15 kg/hm²/d,然后缓慢下降。由此可见,小流域紫色土在施用尿素后的第 4~5 d 氨挥发速率最大,3 种样地氨挥发速率的大小依次为:水田>果林>旱地。

FF02、DL02 和 PF02 的氨挥发速率变化规律比较一致,均表现为施肥后氨挥发速率迅速增加,第 3 d 达到峰值,分别为 15.55、21.11、38.69 kg/hm²/d,随后均迅速下降。由此可见,耕地在施用碳铵后第 3 d 氨挥发速率达到峰值,随后下降,样地间氨挥发

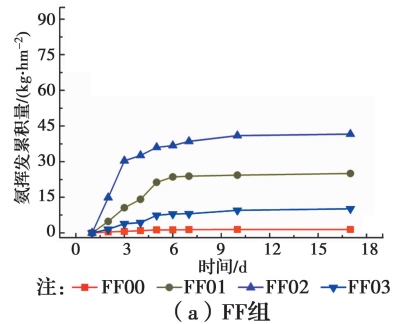
速率的大小依次为:水田>旱地>果林。

分析复合肥的氨挥发速率发现,整体变化幅度不大,在 0.00~3.40 kg/hm²/d 之间波动。FF03 和 DL03 呈现相同的氨挥发规律,在施肥后第 3 d 达到小高峰,分别为 2.39、1.94 kg/hm²/d,随即在第 4 d 下降,然后,在第 5 d 达到峰值 3.05、2.72 kg/hm²/d,5 d 后氨挥发速率缓慢降低。PF03 的氨挥发速率在第 3 d 已达到峰值 3.40 kg/hm²/d,随后呈波浪下降。

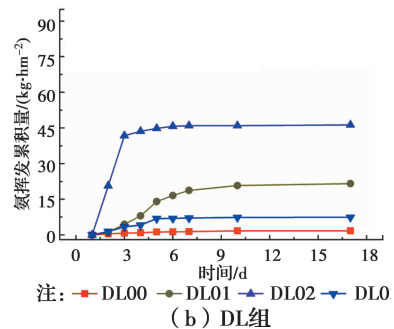
综上所述,3 种肥料在不同农耕模式下的氨挥发特征为:复合肥的氨挥发变化平缓,氨挥发速率最低;碳铵的氨挥发在第 3 d 出现峰值,随后快速下降;而尿素的氨挥发峰值滞后于碳铵,在第 4~5 d 出现,然后缓慢下降。

2.2 氨挥发累积量 C_t

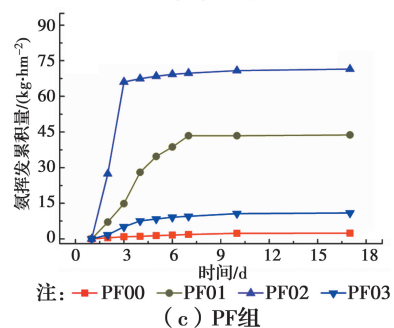
图 3 为不同农耕模式下氨挥发累积量。由图 3 可知,在不同施氮类型和不同农耕模式下,氨挥发累积量与氨挥发速率表现出相一致的规律。方差分析表明,各实验组间存在显著差异。



注: — FF00 — FF01 — FF02 — FF03
(a) FF组



注: — DL00 — DL01 — DL02 — DL03
(b) DL组



注: — PF00 — PF01 — PF02 — PF03
(c) PF组

图 3 氨挥发累积量

Fig. 3 Accumulation of ammonia volatilization

进一步分析发现,各个不同样地的氨挥发累积量随着实验时间的增加明显增加,除了碳铵在施肥3 d后氨挥发累积量趋向平缓,另两种氮肥在施肥7 d后趋向平缓,说明氨挥发在施肥后7 d内基本完成。其中,碳铵的氨挥发累积量最高,分别为41.64、46.31、71.52 kg/hm²/d(按果林、旱地、水田顺序,下同);在施肥后的1~3 d,氨挥发累积量迅速增加,第3 d氨挥发累积量分别占总挥发量的73%、90.3%和92.4%。在4~7 d,氨挥发累积量变化较小,7 d后,氨挥发累积量趋于平稳。尿素的氨挥发累积量相对碳铵而言增加相对较缓,1~7 d,氨挥发累积量缓慢增加,7 d之后,氨挥发量与对照基本持平。复合肥的氨挥发累积量最低,监测期间,变化范围为7~10 kg/hm²,整体呈增加的趋势,但变化幅度不大。

分析还发现,复合肥氨挥发累积量呈一个缓慢增加的趋势;而尿素和碳铵的氨挥发累积量表现为两个阶段,一个是施肥后立即进入的快速增加阶段,另一个是3~7 d后进入的缓慢增加阶段,这与Chen等^[23]、Mandal等^[24]研究结果相似。

2.3 氨挥发率

研究采用式(4)计算氨挥发净损失率,即氨挥发率。小流域典型农耕模式下氨挥发率如图4所示。方差分析表明,各样地间数据差异显著。碳铵、尿素和复合肥的氨挥发率的大小依次为碳铵>尿素>复合肥,其氨挥发率范围分别为17.86%~30.70%、8.82%~18.37%和2.56%~3.86%。

对比3种典型农耕模式发现,果林的氨挥发率为3.86~17.86%,旱地为2.56%~19.81%,水田

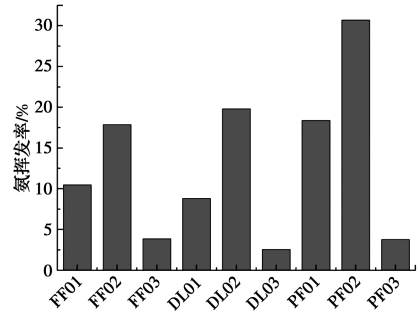


图4 氨挥发率

Fig. 4 Ammonia volatilization loss ratio

为3.76%~30.70%,说明同一农耕模式下,施加不同的氮肥,氨挥发率差异大,氨挥发率主要受氮肥类型影响。对3种农耕模式下施加不同氮肥后氨挥发率分别进行比较发现,水田施加3类氮肥后的氨挥发率均最大,而旱地和果林3类氮肥氨挥发率相当。由此可知,水田的氨挥发损失最大,旱地和果林的氨挥发损失总体相当。

2.4 氮素平衡

氮素收支平衡分析是合理、有效地理解小流域氮循环的重要手段,也是对其环境效应评价的关键。氨挥发作为小流域氮素输出的途径之一,其相对程度只有通过氮素平衡分析才能获得。因此,以小流域3种典型农耕模式作单独子系统,分别估算流域内果林、旱地和水田的氮素收支情况,具体估算方法及过程见刘京等^[25]、郭劲松等^[6]、Ouyang等^[4]的研究。其中,氮输入包括化肥施用、大气沉降、生物固氮等,输出包括淋溶径流损失、氨挥发等,具体见表2和图5。

表2 新政小流域典型农耕模式下氮的表现平衡

Table 2 Apparent N balance in typical land of Xinzheng Watershed

用地类型	输入/(kg·a ⁻¹)									输出/(kg·a ⁻¹)										
	化肥	大气沉降	生物固氮	非生物固氮	母岩输入	种子	人畜排泄	有机垃圾	秸秆还田	合计	淋溶	径流损失	水土侵蚀	氨挥发	反硝化	秸秆还田	秸秆燃烧	农产品出售	农产品自销	合计
果林	11 759.19	762.75	—	379.40	—	—	880.89	—	7.09	13 789.32	880.89	—	—	1 238.72	1 749.50	346.10	130.58	1 309.97	1 763.88	7 419.64
旱地	9 946.83	341.58	624.31	169.50	4 521.13	1.28	675.34	7.24	9.06	16 296.27	675.34	214.14	1 101.69	3 457.37	1 016.32	155.00	471.26	953.90	1 492.02	9 537.03
水田	1 793.16	267.50	—	266.14	—	—	472.66	5.69	20.23	2 852.53	472.66	157.55	182.19	508.66	151.80	121.38	20.64	1 348.90	573.81	3 537.59

注:“—”表示未产生或产生量忽略不计的氮素输入或输出。

果林、旱地和水田氮素年输入量分别为13 789.32、16 296.27、2 852.53 kg/a,其中,单位面积氮肥输入量为464.79、880.25、202.16 kg/hm²/a,分别占总输入氮量的85.28%、61.04%和63.47%(图5),说明化肥是流域内氮素的主要来源。流域内典型农耕

模式中,果林和旱地的氮肥输入量较大,均高于最佳施肥量205.5~222.2 kg/hm²/a^[26],可见,流域内存在严重的化肥输入过量和氮肥配施结构不合理的问题。一方面造成资源浪费,另一方面由于化肥过量输入导致氨挥发、径流、淋溶等问题,增加了三峡库

区氮污染负荷。

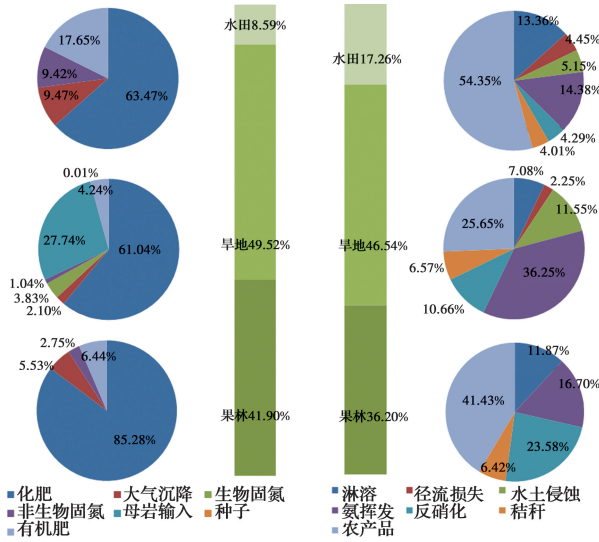


图 5 新政小流域坡耕地氮收支结构图

Fig. 5 Nitrogen budget structure diagram in Xinzheng Watershed

此外,流域内果林、旱地和水田单位面积氮输出量分别为 293.27、843.98、398.83 kg/hm²/a,均高于全国单位面积损失氮量 87.1 kg/hm²/a^[27]。流域内氮回收量(指输出氮素中秸秆和农产品等能够回收再利用的氮素)只占总输出氮的 42.39%,其中,果林、旱地和水田分别为 47.85%、32.21%、58.37%,说明氮素的利用率不足 50%,大多数以氨挥发、径流、淋溶等形式损失。就损失途径分析,小流域氮损失(氮损失=输出氮-氮回收)主要以氨挥发和反硝化等气态氮形式流失,果林、旱地和水田的氨挥发、反硝化损失的氮素分别占氮损失量的 77.23%、69.20%和 44.84%。尤其是旱地,氮损失量达 572.11 kg/hm²/a,分别是果林和水田氮损失量的 3.74 倍和 3.45 倍。

小流域内氮输入总量为 723.80 kg/hm²/a,输出总量为 450.72 kg/hm²/a。土壤残留氮量为 273.07 kg/hm²/a,分别是氮素输出总量和输入总量的 0.61 倍和 0.38 倍。其中,果林和旱地分别有 251.77、598.16 kg/hm²/a 的氮素残留于土壤中,加大了氮素面源污染风险。

3 讨论

3.1 不同用肥模式的氨挥发特征

小流域典型农耕模式下,氨挥发特征为:复合肥的氨挥发变化平缓,氨挥发速率最低;碳铵的氨挥发在第 3 d 出现峰值,随后快速下降;而尿素的氨挥发

峰值滞后于碳铵,在第 4~5 d 出现,然后缓慢下降。针对氨挥发过程进一步研究发现,施肥后,3 种肥料氨挥发速率均随着监测时间的延长呈现先增加后降低的趋势,氨挥发速率峰值出现在施肥后的第 3~5 d。相比而言,碳铵的氨挥发速率峰值出现最早,尿素峰值出现滞后,而复合肥的氨挥发速率整体较平缓,无明显峰值出现。

施肥后,氨挥发特征不同主要与肥料性质有关。从 3 种氮肥的变化趋势来看,碳铵属于速效性肥料,主要以 NH₄⁺ 形态存在,易分解为 NH₃、CO₂ 和 H₂O 3 种气体挥发到大气中。由于施肥期间温度较高,氨挥发非常迅速,在施肥后第 3 d 即达到峰值,第 4 d 因温度降低的原因,加上施入土壤的铵与土壤胶体形成结合态铵离子,使得氨挥发速率降低。尿素施入土壤后,需要在脲酶的作用下水解为碳酸铵或碳酸氢铵,进而再产生氨挥发。因此,尿素的氨挥发峰值滞后于碳铵。此外,果林在施加尿素后 1~6 d 出现两个峰值,这是因为,在实验正式开始前,果林土壤本来氮素残留量少,加上其翻耕少、孔隙度低、容重高、砂粒含量高^[28],导致施加尿素后,氨挥发速率增加缓慢。第 4 d 因气温降低的原因,氨挥发开始降低,之后,随着气温回升以及土壤中脲酶增多,促进尿素水解,到第 5 d 氨挥发又达到峰值。复合肥的氨挥发速率变化平缓,挥发速率较低,这是由于复合肥是由 N、P、K 等多种营养成分复合而成,营养元素的存在改变了土壤微环境,抑制了土壤 pH 值的过度升高,使得土壤对 NH₄⁺ 的固持能力增强,最终导致氨挥发量降低。

实验观测的后期,尿素和碳铵的氨挥发速率均呈现降低的趋势,原因是由于土壤中有机质分解产生大量有机酸和腐殖酸,使土壤 pH 值下降,并促使土壤对 NH₄⁺ 的吸附增强,进而抑制氨挥发。这间接说明土壤有机质的增加可以有效降低土壤中的氨挥发损失。李燕青^[29]的研究表明,同一施氮水平下,有机肥、化肥配施可降低氨挥发,且氨挥发量随化肥配施比例的增加而增加。由此可见,肥料的配合施用能增强土壤对氨的固持能力。

3.2 土壤氨挥发的影响因素

各样地土壤氨挥发速率存在显著差异,在一定程度上反映出土壤、气候、耕作方式等环境条件对农田氨挥发的影响^[8,12]。一般情况下,施肥后高温少雨的环境促进氨挥发,反之,则不利于氨挥发。学者

们针对尿素的氨挥发特征进行了大量研究,而对于碳铵和复合肥氮的研究相对较少,为了便于对各典型用地模式下氨挥发特性进行比较,此处仅对尿素的氨挥发结果进行比较分析。

分析结果可知,流域内果林、旱地和水田施用尿素后氨挥发率分别为 10.49%、8.82% 和 18.37%。可见,尿素在水田中氨挥发率最高,同样的情况也出现在碳铵中,这可能与水田的湿度有关。田昌等^[30]研究表明,水田处于淹水条件,施入的尿素遇水能迅速进行水解,从而造成氨挥发量较大,且集中在较短时间内。此外,水田氨挥发率高的原因还与水田的 pH 值有关,微碱性的环境有利于氨挥发,而小流域内果林、旱地和水田的 pH 值范围分别为 5.42~5.66、5.81~6.07 和 7.51~7.64^[31],这也解释了同一施肥条件下水田氨挥发率最高的原因。Mandal 等^[24]通过研究证实了这一点,当 pH 值从 5.50 增加到 9.04 时,氨挥发累积量和氨挥发率均呈现增加趋势,氨挥发累积量从 105.58 mg/kg 增至 150.50 mg/kg。Lei 等^[14]通过室内研究发现,当土壤温度由 10℃ 增加到 35℃ 时,脲酶活性增加了 33%~41%,提高了反应物分子间的碰撞频率,从而使土壤中尿素的水解速率呈常数增加,氨挥发速率也随之加快。也有研究认为,土壤含水量适中才有利于氨挥发。当土壤含水量过低时,氮肥在土壤中的水解作用受到抑制,进而使氨挥发受阻;土壤含水量过高,虽然氮肥的水解过程加快了,但过多的水分降低了土壤中的铵态氮浓度,降低了氨挥发率^[14]。

3.3 减缓氨挥发氮素流失的措施

流域内果林、旱地和水田的氨挥发总量分别为 1 238.7、3 457.4、508.7 kg/a,分别占总氮输出量的 16.70%、36.25% 和 14.38%,表明氨挥发是小流域氮损失的最主要途径之一。与其他研究结果相比,小流域氨挥发损失明显高于崔健等^[7]的相关研究。说明三峡库区紫色土坡耕地的氨挥发损失在全国处于偏高水平。

造成小流域氨挥发率偏高的原因为:1)传统的施肥方式。实地调研表明,小流域施肥主要为表土施肥,缺少翻耕等农事活动,肥料裸露在表土上。研究表明,传统的施肥方式不利于土壤固定氮素,也不利于植物吸收,再加上表层光照强、温度高、空气流通性好等原因,大量肥料氮通过氨挥发而损失^[32];而采用深施覆土或表施后及时灌水的方法,可以降

低表层土壤氮肥浓度,进而起到抑制氨挥发的作用^[33]。杨晓云等^[34]研究发现,尿素深施更有利于作物快速吸收,降低土壤中 NH_4^+ 浓度,使氨挥发降低。此外,施肥后立即灌水,能够使大部分尿素在水解之前随下渗水进入深层土壤,抑制了氨挥发。2)小流域雨量充沛、气温较高(尤其是夏季)。雨水可以增强土壤中铵的水解,进而促进氨挥发;而温度与氮肥氨挥发呈显著正相关,施肥后较高的温度使氮素转化达到平衡快,造成氨挥发率也较高。农户应尽量避免在高温多雨时段进行施肥活动。3)小流域氮肥施加结构不合理。氮素收支结果表明,小流域每年氮素残留量达 273.07 kg/hm²,其中,果林和旱地残留量较大,残留的氮素增加了土壤氨挥发;而且小流域氮肥的施用多为单一施肥而缺少有机肥配施,缺少对 NH_4^+ 的固持作用。因此,可以通过减少旱地和果林的氮肥输入来减少氨挥发;从环保的角度出发,旱地和果林每年氮肥的施用量理论上应当分别减少 251.77、598.16 kg/hm² 左右。然而,为了保持土壤肥力以及稳定农产品产量,实际减少量应该低于上述值,具体减少量应当结合农作物产量进一步研究。另一方面,减少氨挥发速率大的化肥的使用也可减缓环境污染,如减少碳铵的使用。此外,将化肥与有机肥配施也是减缓土壤氨挥发的有效途径。

由此可见,在保持产量的情况下,适当减少施肥量,优化流域肥料结构,采取氮肥配合磷钾肥等复配施用方式,提高种植科技水平等是降低氮肥氨损失量的有效途径。此外,配施缓释剂或缓释肥等新型肥料也是降低氨挥发损失的途径之一。减少氨挥发氮素流失能够减缓三峡库区氮污染,使三峡库区水体富营养化从源头上得到治理。

4 结论

1)三峡库区紫色土典型农耕模式下氨挥发速率表现为:复合肥的氨挥发变化平缓,氨挥发速率最低;碳铵的氨挥发在第 3 d 出现峰值,随后快速下降;而尿素的氨挥发峰值滞后于碳铵,在第 4~5 d 出现,然后缓慢下降。复合肥氨挥发累积量呈一个缓慢增加的趋势;而尿素和碳铵的氨挥发累积量,表现为两个阶段,一是施肥后立即进入的快速增加阶段,一是 3~7 d 后的缓慢增加阶段。

2)对于肥料种类而言,碳铵的氨挥发率为

17.86%~30.70%, 尿素为 8.82%~18.37%, 复合肥为 2.56%~3.86%。施肥种类间的氨挥发率大小依次为: 碳铵>尿素>复合肥。于农耕模式而言, 果林的氨挥发率为 3.86%~17.86%, 旱地为 2.56%~19.81%, 水田为 3.76%~30.70%。典型农耕模式间的氨挥发率大小依次为: 水田>果林>旱地。

3) 小流域氮素收支估算发现, 氨挥发是小流域氮流失的主要途径之一, 典型农耕模式下, 水田、果林和旱地的氨挥发损失分别占氮输出总量的 14.38%、16.70% 和 36.25%, 占氮损失的 44.84%、77.23% 和 69.20%。

参考文献:

- [1] ZHANG T, NI J P, XIE D T. Assessment of the relationship between rural non-point source pollution and economic development in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(8): 8125-8132.
- [2] CHEN L, XU J J, WANG G B, et al. Influence of rainfall data scarcity on non-point source pollution prediction: Implications for physically based models [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 562: 1-16.
- [3] ZHANG B, GUO J S, FANG F, et al. Concentration of nutrients in the soil in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Ecology & Hydrobiology*, 2012, 12(2): 105-114.
- [4] OUYANG W J, LI Z, LIU J, et al. Inventory of apparent nitrogen and phosphorus balance and risk of potential pollution in typical sloping cropland of purple soil in China: A case study in the Three Gorges Reservoir Region [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 620-628.
- [5] 郭劲松, 刘京, 方芳, 等. 三峡库区紫色土坡耕地小流域氮收支估算及污染潜势[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(11): 141-147.
- GUO J S, LIU J, FANG F, et al. Input-output budgets for nitrogen in a typical purple soil sloping ploughland in Three Gorges Areas [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(11): 141-147. (in Chinese)
- [6] 李哲, 屈忠义, 任中生, 等. 河套灌区滴灌施肥对土壤氨挥发及玉米氮肥利用率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(11): 37-42, 49.
- LI Z, QU Z Y, REN Z S, et al. Nitrogen use efficiency and ammonia oxidation of corn field with drip irrigation in Hetao irrigation district [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(11): 37-42, 49. (in Chinese)
- [7] 崔键, 周静, 马友华, 等. 春季马唐-秋季冬萝卜红壤和黄壤中尿素氨挥发损失状况的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2007, 34(2): 265-269.
- CUI J, ZHOU J, MA Y H, et al. N-loss of ammonia-volatilizing from urea applied in both red soil and yellow soil with the rotation of *Digitaria ischaemum* in spring and winter radish in autumn [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2007, 34(2): 265-269. (in Chinese)
- [8] OTTO R, MARIANO E, MULVANEY R L, et al. Effect of previous soil management on sugarcane response to nitrogen fertilization [J]. *Scientia Agricola*, 2019, 76(1): 72-81.
- [9] RAMANANTENASOA M M J, GILLIOT J M, MIGNOLET C, et al. A new framework to estimate spatio-temporal ammonia emissions due to nitrogen fertilization in France [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 205-219.
- [10] 赵蒙, 曾科, 姚元林, 等. 聚脲甲醛缓释肥对太湖稻麦轮作体系氨挥发及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(1): 1-10.
- ZHAO M, ZENG K, YAO Y L, et al. Effects of polyurea-formaldehyde on ammonia volatilization and yields under rice-wheat rotation in Taihu Region [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(1): 1-10. (in Chinese)
- [11] BEDOS C, ALLETTO L, DURAND B, et al. Observed volatilization fluxes of S-metolachlor and benoxacor applied on soil with and without crop residues [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(4): 3985-3996.
- [12] 肖娇, 樊建凌, 叶桂萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氨挥发损失及其影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(10): 2011-2018.
- XIAO J, FAN J L, YE G P, et al. Ammonia volatilization from fluvo-aquic clay soil and its influencing factors during wheat growing season under different fertilization [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 2011-2018. (in Chinese)
- [13] GARCIA L, BEDOS C, GENERMOET S, et al. Assessing the ability of mechanistic volatilization

- models to simulate soil surface conditions a study with the Volt'Air model [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 3980-3992.
- [14] LEI T, GUO X H, MA J J, et al. Kinetic and thermodynamic effects of moisture content and temperature on the ammonia volatilization of soil fertilized with urea [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(6): 134-143.
- [15] 王桂良, 崔振岭, 陈新平, 等. 南方稻田活性氮损失途径及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2337-2345.
- WANG G L, CUI Z L, CHEN X P, et al. Reactive nitrogen loss pathways and their effective factors in paddy field in southern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2337-2345. (in Chinese)
- [16] CHEN Z, GE H X, CHANG Z Q, et al. Nitrogen budget in recirculating aquaculture and water exchange systems for culturing *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(4): 905-912.
- [17] ZHANG W S, LI H P, LI Y L. Spatio-temporal dynamics of nitrogen and phosphorus input budgets in a global hotspot of anthropogenic inputs [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 656: 1108-1120.
- [18] 张千千, 缪丽萍, 孙继朝, 等. 稳定同位素识别水体硝酸盐污染来源的研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 742-749.
- ZHANG Q Q, MIAO L P, SUN J C, et al. Research advances in identifying nitrate pollution sources of water environment by using stable isotopes [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 742-749. (in Chinese)
- [19] MENTZAFUO A, DIMITRIOU E. Nitrogen loading and natural pressures on the water quality of a shallow Mediterranean lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 134-143.
- [20] WANG X, FOX A D, ZHUANG X L, et al. Shifting to an energy-poor diet for nitrogen? Not the case for wintering herbivorous Lesser White-fronted Geese in China [J]. *Journal of Ornithology*, 2014, 155(3): 707-712.
- [21] 张彬, 陈猷鹏, 方芳, 等. 三峡库区淹没消落区土壤氮素形态及分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(5): 1126-1133.
- ZHANG B, CHEN Y P, FANG F, et al. Nitrogen forms and their distribution characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1126-1133. (in Chinese)
- [22] 李宗新, 王庆成, 刘开昌, 等. 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氨挥发规律[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 307-314.
- LI Z X, WANG Q C, LIU K C, et al. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 307-314. (in Chinese)
- [23] CHEN A, LEI B, HU W, et al. Characteristics of ammonia volatilization on rice grown under different nitrogen application rates and its quantitative predictions in Erhai Lake Watershed, China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 139-152.
- [24] MANDAL S, THANGARAJAN R, BOLAN N S, et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat [J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 120-127.
- [25] 刘京. 三峡紫色土坡耕地小流域氮磷收支及流失风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- LIU J. Input-output budgets for N and P in a typical purple soil sloping ploughland in three gorges areas[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [26] 马志超, 张明学, 周仓军, 等. 关中西部玉米氮磷钾养分丰缺指标及经济最佳施肥量研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(11): 145-151.
- MA Z C, ZHANG M X, ZHOU C J, et al. Abundant/lack index of nitrogen, phosphorus, and potassium for maize in Western Guanzhong and determination of economic optimum fertilization rate [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(11): 145-151. (in Chinese)
- [27] 何文天. 基于作物—土壤模型的作物产量与农田氮素平衡模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- HE W T. Modelling crop yield and Nitrogen balance based on crop-soil models [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. (in Chinese)
- [28] 任晓, 刘红兵, 朱波, 等. 林地转变为耕地对紫色土 N_2O 排放的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 214-221.
- REN X, LIU H B, ZHU B, et al. Impact of

- conversion from forestland to cropland on soil N_2O emission from purplish soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 214-221. (in Chinese)
- [29] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- LI Y Q. Study on agronomic and environmental effects of combined application of different organic manures with chemical fertilizer [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [30] 田昌, 周旋, 谢桂先, 等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(4): 387-397.
- TIAN C, ZHOU X, XIE G X, et al. Ammonia volatilization loss and nitrogen use efficiency in double-cropping rice field as affected by decreasing controlled-release urea application level [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(4): 387-397. (in Chinese)
- [31] 朱利. 坡地利用方式和改造措施对紫色土理化性质的影响[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2012.
- ZHU L. Effect of slope-land ameliorating measures and land-use patterns on purple soil physical and chemical properties [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [32] LI Q Q, YANG A L, WANG Z H, et al. Effect of a new urease inhibitor on ammonia volatilization and nitrogen utilization in wheat in north and northwest China [J]. *Field Crops Research*, 2015, 175: 96-105.
- [33] 杨杉, 吴胜军, 王雨, 等. 三峡库区农田氨挥发及其消减措施研究进展[J]. *土壤*, 2014, 46(5): 773-779.
- YANG S, WU S J, WANG Y, et al. Ammonia volatilization and its reducing countermeasures in the agro-ecosystem of the three gorges area: A review [J]. *Soils*, 2014, 46(5): 773-779. (in Chinese)
- [34] 杨晓云, 杨虎德. 不同施肥条件下北方夏玉米农田土壤氨挥发研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(11): 137-142.
- YANG X Y, YANG H D. Soil ammonia volatilization under the different fertilization in summer cornfarmland in North China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(11): 137-142. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)