

# 春秋季节红壤旱地氮挥发对氮施用量、气象因子的响应\*

周静<sup>1,3</sup> 崔键<sup>2,3</sup> 王国强<sup>1</sup> 何圆球<sup>3</sup> 马友华<sup>2</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 安徽农业大学研究生院, 合肥 230036)

(3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 通过红壤旱地种植牧草马唐和蔬菜冬萝卜轮作试验, 研究了在春秋二季红壤旱地氮挥发对不同施氮量和气象因子的响应。结果表明, 红壤旱地春季牧草实验, 氮肥处理 N90、N160 和 N230, 氮挥发持续 10~17 d, 在施肥后 6~8 d 达到峰值, 峰值(扣除对照 N0) 分别为 N 0.11、0.57 和 1.84 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>。秋季氮肥处理 N70、N130、N190 和 N250 以基肥和以水带肥追施(基/追比为 7:3) 氮挥发持续时间均为 10~11 d, 基肥氮挥发峰值(扣除对照 N0) 分别为 N 0.02、0.05、0.06 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 和 0.09 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>; 追肥氮挥发峰值(扣除对照 N0) 分别为 N 0.05、0.22、0.38 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> 和 0.72 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>。不同施氮处理, 春季累计氮挥发量为 N 0.67~5.16 kg hm<sup>-2</sup>, 占施入肥料 N 的 0.74%~2.24%; 秋季累计氮挥发量为 N 0.37~3.04 kg hm<sup>-2</sup>, 占施入肥料 N 的 1.31%~3.69%。红壤旱地春秋二季氮挥发量( $y$ ) 均随施 N 量( $x$ ) 的提高而指数递增, 其关系式分别为:  $y = 0.1576e^{0.0146x}$  和  $y = 0.1826e^{0.0112x}$ 。显著性检验表明, 春秋两季不同施氮量处理之间, 土壤氮挥发量及挥发通量差异均达到显著水平。春秋二季基肥氮挥发总量和通量均与气温、气压、蒸发量和土温等环境气象因子有较好的相关性( $p < 0.05$ )。

**关键词** 红壤; 施氮量; 气象因子; 氮挥发

中图分类号 S14; S15; S16

文献标识码 A

施用氮肥是粮食增产的主要手段之一, 据联合国粮农组织的统计<sup>[1]</sup>, 化肥对粮食的贡献率占 40% 左右, 我国能以占世界 7% 的耕地养活占世界 22% 的人口, 化肥在其中起了重要作用。然而施用氮肥, 特别是化肥氮素的 1/3 以上并未用于作物的增产, 而是以不同的形式进入地球生物圈中<sup>[2]</sup>。研究表明<sup>[3,4]</sup>, 通过氮挥发损失的 N 可达施入量的 9%~42%, 其中碳铵的 N 素损失在 49%~66%, 尿素在 29%~40%。

施入土壤中的氮肥, 除被作物吸收外, 或随雨水地表径流损失, 或随土壤渗漏到土壤深层, 或以 NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等形态进入大气, 造成肥料中氮素的损失。研究结果表明<sup>[5]</sup>, 连续多年施用大量 N 素化肥而不施有机肥条件下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 挥发是 N 素损失的主要途径; 施用高量有机肥和 N 素化肥条件下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 挥发和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶几乎是两条同等重要的 N 素损失途径。施用氮肥后, 石灰性土壤氮挥发损失量占施肥量的 0.41%~40.0%<sup>[3,6,7]</sup>。红壤地区施氮

肥, 土壤氮挥发损失氮量占施纯氮量的比例变化在 0.02%~14.8% 之间<sup>[8~10]</sup>。影响土壤氮挥发损失氮的因素主要有气象因子(温度、湿度、风速等)、土壤性质、化肥种类和施用方式、作物及其种植制度等<sup>[10~12]</sup>。但人们对土壤氮挥发的研究, 多集中于石灰性土壤上。如北方潮土上种植的水稻、玉米和小麦等粮食作物施氮肥后的氮挥发率分别为 30%~39%、11%~48% 和 1%~20%, 表明氮挥发是北方潮土地区水稻和玉米上肥料氮损失的一条重要途径<sup>[13~15]</sup>。以往对红壤地区氮挥发的研究多局限于水稻等作物<sup>[2,9,10]</sup> 上, 而对红壤旱地氮挥发的研究报道较少, 在牧草马唐-冬萝卜轮作下红壤旱地氮挥发的研究更鲜见详细报道。马唐是对环境适应力强的田间常见的优良牧草, 也可做保水固沙植物。冬萝卜也是红壤区主要的蔬菜之一, 种植面积较大。本试验在红壤旱地进行马唐-冬萝卜轮作条件下, 用经典的密闭室方法, 测定红壤旱地基肥和以水带肥追施氮肥(尿素) 后的氮挥发损失的氮量及动态变化, 并讨

\* 国家自然科学基金项目(40305019) 和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-413) 资助

作者简介: 周静, 男, 副研究员, 博士研究生。E-mail: zhoujing@issas.ac.cn

收稿日期: 2006-01-26; 收到修改稿日期: 2006-06-11

论氨挥发损失氮素量与施氮肥量及环境气象因素的关系,旨在探索红壤旱地不同利用方式下和春秋二季不同季节下施肥的技术,为提高红壤旱地氮肥利用率提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点

试验地位于江西鹰潭中国科学院红壤生态试验站内养分平衡试验区,位于东经  $116^{\circ}55'$ ,北纬  $28^{\circ}12'$ ,气候温热多雨,年平均温度  $17.6^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温是  $5\,528^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量  $1\,795\text{ mm}$ ,年蒸发量  $1\,318\text{ mm}$ ,年干燥度小于 1。降水季节分布不均,4 月至 6 月份降水量占全年的 50%,全年干湿季节明显。年无霜期 260 d 左右,年日照数  $1\,800\text{ h}$  左右,日照时数百分比约在 40% 左右,太阳辐射量在  $4.18 \times 10^5\text{ J cm}^{-2}$  左右。

### 1.2 试验材料

供试土壤为第四纪红黏土发育的旱地红壤,耕层土壤有机质  $11.05\text{ g kg}^{-1}$ ,全氮  $0.54\text{ g kg}^{-1}$ ,碱解氮  $52.60\text{ mg kg}^{-1}$ ,有效磷  $44.83\text{ mg kg}^{-1}$ ,速效钾  $283.52\text{ mg kg}^{-1}$ ,水提法土壤 pH 为 4.8。

供试氮肥为临泉产的尿素,含 N 量 46.3%。供试作物为牧草马唐 (*Digitaria ischaenum*) 和广东汕头培育的南畔洲晚熟冬萝卜 (*Raphanus sativus*)。

### 1.3 试验设计

单因子差异重复实验设计。实验地面积  $1\,600\text{ m}^2$ ,实验处理小区面积  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,各处理小区随机排列,3 次重复,各小区土壤基本性质、耕作措施等相同。

春季牧草马唐试验:播种于 2005 年 4 月 14 日,收获于 2005 年 7 月 23 日。根据尿素用量设 4 个施氮处理:纯 N 0、90、160、230  $\text{kg hm}^{-2}$ ,处理号分别标记为 N0、N90、N160 和 N230。各试验区磷钾肥施用量相同,分别为  $\text{P}_2\text{O}_5\ 750\text{ kg hm}^{-2}$  和  $\text{K}_2\text{O}\ 300\text{ kg hm}^{-2}$ 。所有肥料均作基肥,撒施到土壤耕层,覆土耙均,施肥时间为 2005 年 4 月 14 日。

秋季冬萝卜试验:播种于 2005 年 9 月 6 日,收获于 2006 年 1 月 13 日。试验设 5 个氮素施用量水平处理,0、70、130、190、250  $\text{kg hm}^{-2}$ ,处理号分别标记为 N0、N70、N130、N190 和 N250。氮肥分为基肥和追肥,基/追比为 7:3,分两次施入土壤耕层。尿素施入方式:基肥撒施到土壤耕层,覆土耙均,施肥时间为 2005 年 9 月 6 日;追肥在冬萝卜莲座期,模拟降雨以水带肥方式施入耕层,施入时间为 2005 年 10 月 9 日。另外各试验区磷钾肥施用量相同,分别为

$\text{P}_2\text{O}_5\ 375\text{ kg hm}^{-2}$  和  $\text{K}_2\text{O}\ 150\text{ kg hm}^{-2}$ ,均作为基肥,施入时间 2005 年 9 月 6 日。

### 1.4 分析测定方法

1.4.1 氨挥发测定 采用通气密闭室法测定<sup>[3]</sup>。密闭室高 50 cm,直径 30 cm,采用透明的有机玻璃材料制作,室底部开放,顶部留一通气孔(直径 30 mm)与 2.5 m 高的通气管连通,将通气管架到地面 2.5 m 高处,以便尽可能地减少交换空气对氨挥发测定的影响。将敞开端插入旱耕地土壤中,使土面与室顶之间形成一个有限的密闭空间。用抽气减压的办法将密闭室空间内空气中的氨吸入装有 2% 硼酸 25 ml 的 150 ml 的三角瓶,使其吸收固定于硼酸溶液中,再用标准酸滴定硼酸中所吸收的  $\text{NH}_3$ ,再减去空白处理区硼酸所吸收的  $\text{NH}_3$ ,然后折算为纯氮量,即为氨挥发损失的 N。

土壤氨挥发量于尿素施入后当天开始测定,每日测定 2 次,每次 2h,分别为上午 8:30~10:30 和下午 15:00~17:00;测定截至到测不出氨挥发为止。春季试验于 2005 年 4 月 14 日开始测定,截至于 2005 年 4 月 30 日,共测定 17 d,34 次;秋季试验,基肥于 2005 年 9 月 6 日开始,截至于 2005 年 9 月 15 日,共测定 10 d,20 次;莲座期追肥于 2005 年 10 月 9 日开始,于 2005 年 10 月 15 日结束,共 11 d,22 次。

1.4.2 气象因素测定 大气温 度、土壤温度、大气压强、风速、日蒸发量等气象环境因素在红壤生态实验站气象观测场内观测、记录,所用仪器为芬兰产 VSALA-M520 自动气象观测仪。测定时间从施肥当天开始,到氨挥发结束之日停止。测定地点距离实验地约 100 m。

1.4.3 土壤含水量测定 用土壤含水量探测仪 MPM-160 测定。试验期间,每天上午 10:00 和下午 15:00 各测一次,并将平均值作为当天土壤的实际含水量值。测定日期和天数同氨挥发测定日期和天数相同。

### 1.5 统计方法

所测数据采用 SAS 8.0 软件邓肯新复极差法 (SSR method) 进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氨挥发通量的变化

2.1.1 春季马唐生长期 内氨挥发通量的变化 牧草马唐从 2005 年 4 月 14 日施肥到 2005 年 4 月 30 日氨挥发测定结束,不同施氮量处理的氨挥发通量

(扣除对照 N0) 动态变化如图 1。从中可以看出, 尿素施入红壤旱地, 氮的挥发比较明显。N90 处理的氮挥发持续 14 天, 其挥发通量比较平缓, 在施肥后 7~ 8 d 出现一个峰值; N160 处理的氮挥发也持续 14 天, 在施肥后 8 d 有一个挥发峰, N230 处理氮挥发持续了 17 天, 有二个挥发峰, 分别出现在施肥后的 8 d 和 14~ 16 d。三个不同施氮处理, 氮挥发通量均在施肥后第 7~ 8 d 达到峰值。N90 处理、N160 处理和 N230 处理的氮挥发通量峰值分别为  $N\ 0.11\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 、 $0.57\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$  和  $1.84\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 。其中 N230 处理的峰值分别是 N160 处理和 N90 处理的 3.2 倍和 16.7 倍。显著性检验表明, 在施肥后 17 d 内, N90、N160 和 N230 处理间的氮挥发通量差异达到显著水平 ( $n = 51, p < 0.05$ )。

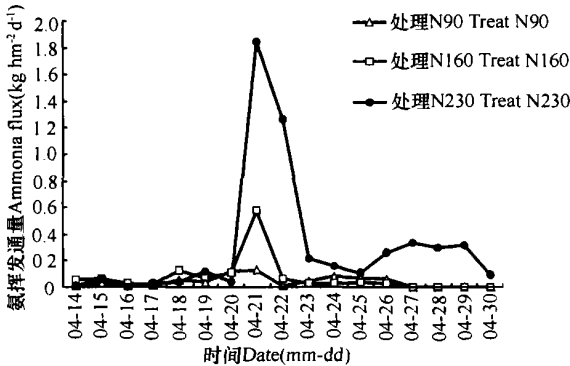


图 1 春季不同施氮量下牧草马唐地氮挥发通量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes in ammonia flux with N rate in Smooth Crabgrass fields in spring

2.1.2 秋季冬萝卜生长期氮挥发通量的变化  
2005 年秋季冬萝卜基肥和莲座期追肥氮挥发 (扣除对照 N0) 的动态变化如图 2。二次施肥时间分别为 9 月

6 日和 10 月 9 日, 从图 2 可以看出, 氮挥发持续时间均为 10~ 11 d。不同处理, 基肥和追肥相互间的变化趋势基本一致, 施肥量越高, 相应的氮挥发通量也越大。基肥处理 N70、N130、N190 和 N250 氮挥发通量的最大值分别为  $N\ 0.02\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 、 $N\ 0.05\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 、 $N\ 0.06\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$  和  $N\ 0.09\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ , N250 处理氮挥发通量的最大值分别为 N70、N130 和 N190 处理的 4.5、1.8 和 1.5 倍, 差异显著 ( $p < 0.10$ ); 莲座期追肥, N70、N130、N190 和 N250 处理的氮挥发通量最大值分别为  $N\ 0.05\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 、 $N\ 0.22\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ 、 $N\ 0.38\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$  和  $N\ 0.72\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}\ \text{d}^{-1}$ , N250 处理氮挥发通量最大值分别为 N70、N130 和 N190 处理的 14.4 倍、3.3 倍和 1.9 倍, 差异达到极显著水平 ( $p < 0.01$ )。同时, 显著性检验表明, 无论基肥还是追肥处理, 氮挥发期间, 各处理间的氮挥发通量差异均达到极显著水平 ( $n = 40, p < 0.01$ )。

红壤旱地秋季种植冬萝卜, 各处理氮肥用量是基肥大于追肥, 而氮挥发通量却是基肥远小于追肥。基肥是将尿素撒施于红壤耕层, 在土壤水和土壤酶等作用, 酰胺态氮缓慢地从尿素颗粒中由外向内转化成铵态氮, 氨气的形成和逸出土壤比较缓慢<sup>[16]</sup>。高鹏程和张一平在陕西黄绵土研究氮挥发与土壤水分散失的结果<sup>[17]</sup>表明, 随着土壤湿度增加, 土壤水汽携带作用使氮挥发量增加。而追肥的方式为模拟降雨以水带肥, 尿素首先全部溶解在水中, 土壤水分有利于尿素的转化, 促进氨态氮的产生; 同时, 在太阳蒸发作用下, 土壤水汽携带氨的能力增强。这是基肥和追肥氮挥发通量差异较大的主要原因。

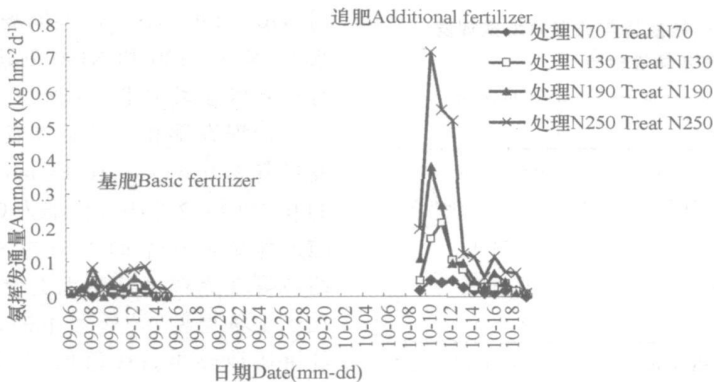


图 2 秋季不同施氮量下冬萝卜土壤氮挥发通量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes in ammonia flux with N rate in winter radish fields in autumn

试验表明, 施入尿素后, 马唐-冬萝卜轮作下红壤旱地氨挥发持续 10~17 d, 主要集中在施肥后的前 8 d, 并在施肥后 6~8 d 达到峰值。有研究表明, 尿素施入石灰性土壤后, 氨挥发主要集中在施肥后的前 4 d 内<sup>[8]</sup>。本实验中, 尿素基施, 当施氮量  $90 \text{ kg hm}^{-2}$  及以下时, 氨挥发有一个峰, 高于  $90 \text{ kg hm}^{-2}$  处理的有二个峰, 且春季时氨挥发后一个峰略低于前一个峰, 秋季趋势则相反。二季试验相比, 秋季冬萝卜 N130 和 N250 处理的基施的氮肥量分别为纯氮 91 和  $175 \text{ kg hm}^{-2}$ , 与春季牧草马唐 N90 和 N160 处理的氮用量相当, 但秋季氨挥发持续时间较短。实验时, 春季气温和土壤温度平均为  $21.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $25.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 分别比秋季低  $6.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $9.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温度较低, 不利于土壤酶和微生物的活动, 进而造成红壤旱地氨挥发的速度降低, 表现为春季相对于秋季的氨挥发的持续时间较长。这与尿素用量及尿素在土壤中的转化过程、转化机理和当时的气象环境等因素相关<sup>[3, 16, 18]</sup>。这与苏成国等在太湖区乌栅土稻田上的研究结果<sup>[19]</sup>相似。这些气象因素与氨挥发之间的联系, 本文将在 2.3 节讨论, 以试图解释气象因子与氨挥发之间的数值关系。

## 2.2 不同施肥期氨挥发总量的变化

### 2.2.1 不同施氮水平下不同时期氨挥发量的变化

春季红壤旱地种植马唐不同施氮处理, 氨挥发损失量(扣除对照 N0)及其占施入氮量的比率如表 1。N90、N160 和 N230 处理, 14 d 内氨挥发损失 N 量分别为  $0.67 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $1.24 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $5.16 \text{ kg hm}^{-2}$ , 分别占施入 N 量的 0.74%、0.78% 和 2.24%。邓肯新复极差法( $\alpha=0.01$ )检验表明, N230 处理与 N160、N90 处理之间达到极显著水平, 处理 N160 与处理 N90 之间无显著性。

表 1 春季种植马唐不同施氮量与红壤旱地氨挥发损失及其差异性检验

Table 1 Duncan test and ammonia loss in relation to N rate in Smooth Crabgrass field in spring

| 施肥量<br>N rates( $\text{kg hm}^{-2}$ ) | 氨挥发损失氮量<br>N loss amount( $\text{kg hm}^{-2}$ ) | 氮损失比率<br>Loss ratio of N applied(%) |
|---------------------------------------|---|-------------------------------------|
| 90                                    | 0.67 B  | 0.74 B                              |
| 160                                   | 1.24 B  | 0.78 B                              |
| 230                                   | 5.16 A  | 2.24 A                              |

注: 采用邓肯新复极差法 SSR method,  $n=51$ ,  $\alpha=0.01$ , 同一列内不同字母表示在  $p < 0.01$  水平上差异显著 Different letters following the data in the same column denote a significant difference at  $p < 0.01$

秋季种植冬萝卜不同施氮水平, 红壤旱地氨挥

发损失的 N 量(扣除对照 N0)及其占施入 N 量的比率见表 2。N70、N130、N190 和 N250 处理氨挥发总量(基肥和追肥之和)分别为  $0.37 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $0.96 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $1.39 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $3.04 \text{ kg hm}^{-2}$ , 分别占施入 N 量的 1.31%、2.21%、2.23% 和 3.69%。播种期基施各施氮肥量处理, 氨挥发量分别为  $0.10 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $0.17 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $0.22 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $0.46 \text{ kg hm}^{-2}$ , 分别占秋季氨挥发总氮量的 27.47%、17.76%、15.75% 和 15.15%; 莲座期追肥各施氮肥量处理, 氨挥发量分别为  $0.27 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $0.79 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $1.17 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $2.58 \text{ kg hm}^{-2}$ , 分别占秋季氨挥发总 N 量的 74.18%、82.55%、83.75% 和 84.98%。可见, 秋季种植冬萝卜红壤旱地氨的挥发量追肥占较大比例, 与氨挥发通量的结果一致。秋季种植冬萝卜不同施氮水平, 红壤旱地氨挥发量随施氮量的增加而增加, 但在追肥方式下, 各施氮量处理的氨挥发量占总挥发量(基肥+追肥)比率接近, 如 N130、N190 和 N250 处理追肥时氨挥发量占总挥发量损失比率相当, 在 82.55%~84.98%; 基施氮肥氨挥发量及其损失比率都远低于追肥处理的结果。冬萝卜追肥, 一方面可能引起前期施基肥时残留于土壤中的氮素的起爆效应, 造成土壤中  $\text{NH}_4^+$  离子远高于施入尿素分解产生的  $\text{NH}_4^+$  离子, 产生更多的氨气挥发出来; 另一方面, 追肥的施入方式为以水带肥, 既加快了尿素的水解速度, 也增加了土壤的含水量, 进而产生较多的氨气逸出土体。

邓肯新复极差法( $\alpha=0.01$ )检验结果表明, 秋季基肥和追肥累积氨挥发量中, N250 处理与 N70、N130 处理间均达到差异显著性, N190 处理和 N70 处理间氨挥发量差异极显著, 而 N190 处理和 N130 处理间差异不显著。基肥和追肥试验中, N250 处理与 N70、N130、N190 处理间氨挥发差异达到极显著水平, N70、N130 和 N190 处理间氨挥发量的差异没有达到极显著水平(如表 2)。

根据春季和秋季氨挥发的结果, 红壤旱地氨挥发量春季  $0.67\sim 5.16 \text{ kg hm}^{-2}$ , 占施入氮量的比率的 0.74%~2.24%; 秋季为  $0.37\sim 3.04 \text{ kg hm}^{-2}$ , 占施入氮量的比率的 1.31%~3.69%。这远低于艾绍英等在赤红壤砂质土上研究的结果<sup>[8]</sup>, 主要原因在于土壤类型、性质等不同, 第四纪红黏土发育的红壤质地黏重, pH 值低, 不利于氨挥发。同时, 本试验秋季冬萝卜以水带肥式追肥, 比基肥时氨挥发量较大。这与曹兵等<sup>[20]</sup>在潮土上的研究结果不同。他们认为, 相对尿素表施, 表施结合灌溉可抑

制氨的挥发。产生差异的主要原因在于土壤性质和施肥方式不同。尿素结合灌溉表施入潮土, 可被淋洗到土壤深层, 加上随后土表的板结, 从而阻碍了氨气向土表的扩散和逸出。鲁如坤和时正元进行的尿素和碳铵在红壤中的转化研究<sup>[16]</sup>表明, 土壤含水量增加, 利于尿素的水解, 可能使耕层土壤

pH 值有升高的趋势。本实验中尿素以水带肥施入第四纪红黏土发育的红壤, 较基肥产生较多的氨挥发, 可能原因是施肥时土壤含水量增加, 土壤 pH 值可能升高, 加上实验时气温较高, 这些因素利于土壤中铵离子向氨分子的转化。具体结论可待进一步研究。

表 2 秋冬季萝卜基肥和追肥不同施氮量与红壤旱地氨挥发损失及其差异性检验

Table 2 Duncan test and ammonia loss in relation to N rate in winter radish field in autumn

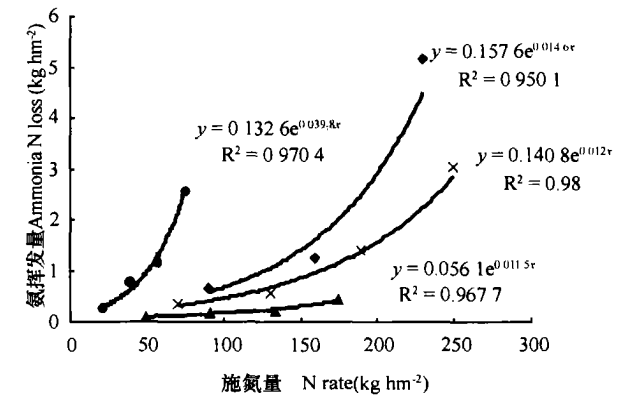
| 施氮量<br>N rate<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 基肥 Basic fertilizer                           |                        | 追肥 Additional fertilizer                      |                        | 合计 Total                                      |                        |
|---|---|------------------------|---|------------------------|---|------------------------|
|   | 氨挥发损失量<br>N loss amount(kg hm <sup>-2</sup> ) | 损失比率<br>Loss ratio (%) | 氨挥发损失量<br>N loss amount(kg hm <sup>-2</sup> ) | 损失比率<br>Loss ratio (%) | 氨挥发损失量<br>N loss amount(kg hm <sup>-2</sup> ) | 损失比率<br>Loss ratio (%) |
| 70                                      | 0.10B   | 0.2                    | 0.27B   | 1.29                   | 0.37C   | 1.31                   |
| 130                                     | 0.17B   | 0.18                   | 0.79B   | 2.03                   | 0.96BC  | 2.21                   |
| 190                                     | 0.22B   | 0.17                   | 1.17B   | 2.06                   | 1.39AB  | 2.23                   |
| 250                                     | 0.46A   | 0.26                   | 2.58A   | 3.43                   | 3.04A   | 3.69                   |

注: 采用邓肯新复极差法 SSR method, n = 44, α = 0.01, 同一列内不同字母表示在 p < 0.01 水平上差异显著 Different letters following the data in the same column denote a significant difference at p < 0.01

2.2.2 春秋两季氨挥发累积量与施氮水平的关系

红壤旱地春季种植牧草马唐和秋季种植冬萝卜不同施氮量与氨挥发量(氨挥发量为每次施肥后土壤氨挥发累积量)之间的关系如图 3 所示。从它们的散点图及趋势上可见, 氨挥发量(y)随施氮量(x)增加呈指数关系递增, 其关系式及相关系数分别为:

- 马唐(基肥):  $y = 0.1576e^{0.0146x}, R^2 = 0.9501$
- 冬萝卜(基肥):  $y = 0.0561e^{0.0115x}, R^2 = 0.9677$
- 冬萝卜(追肥):  $y = 0.1326e^{0.0098x}, R^2 = 0.9704$
- 冬萝卜(基肥+追肥)  $y = 0.1408e^{0.012x}, R^2 = 0.9800$



- ◆ 马唐(基肥) *Digitaria ischaemum* (Basic fertilizer)
- ▲ 冬萝卜(基肥) *Winter-Radish* (Basic fertilizer)
- 冬萝卜(追肥) *Winter-Radish* (Additional fertilizer)
- × 冬萝卜(基肥+追肥) *Winter-Radish* (Basic & additional fertilizer)

图 3 不同时期施氮量与红壤旱地氨挥发量的关系

Fig. 3 Ammonia loss in relation to N rate during different planting seasons

红壤旱地春秋两次基肥氨挥发相比, 同等施氮水平下, 春季氨挥发量要明显高于秋季。春季 N90 处理和秋季 N130 基肥处理相比, 施氮量相当, 但春季氨挥发量为秋季的 6.7 倍, 可见, 气象环境因素影响对红壤旱地氨的挥发具有不可忽略的作用。由于本试验, 施氮水平在 70~250 kg hm<sup>-2</sup>, 施氮量范围相对较窄, 其代表性具有一定的局限性, 需要今后对这种指数关系作进一步研究。

2.3 影响氨挥发通量的主要环境因素分析

氨挥发受多种因子的综合控制<sup>[3, 21]</sup>。上述各节讨论中, 氨挥发可能与气压、蒸发量、大气温度、土壤温度、风速等气象因素关联密切, 为进一步探讨氨挥发与这些气象因素的数值关系, 以试图找出影响氨挥发通量的主要环境因素。本文通过 Microsoft Excel 和 SAS 8.0 分析软件分析不同时期红壤旱地氨挥发通量与土壤温度, 以及与气压、蒸发量、大气温度、风速等气象因子的关系, 其相关阵分别见表 4、表 5 和表 6。春季马唐试验, N90、N160 和 N230 三个施氮水平下的氨挥发通量分别与其对应的大气温度、土壤温度、风速、蒸发量和气压气象因子组成 3 对典型变量; 秋季冬萝卜施氮处理 N70、N130、N190、N250 基肥氨挥发通量分别与其对应的大气温度、土壤温度、风速、蒸发量和气压等气象因子组成 4 对典型变量, 上述 4 个施氮量处理追肥氨挥发通量也分别与其对应的大气温度、土壤温度、风速、蒸发量和气压等气象因子组成 4 对典型变量。SAS 8.0 典型变量分析

结果表明,氨挥发通量的典型变量中,春季基肥 3 对中有 2 对和秋季基肥 4 对中有 1 对分别达到 5% 以上的显著水平,说明不同施氮量下,红壤旱地春秋二季基肥实验中氨挥发通量除受施氮量水平影响外,与气压、蒸发量、大气温度、土壤温度等环境因素有极好的相关性。春季种植马唐基肥实验中,蒸发量和气压是影响氨挥发的主要气象因子;秋季种植冬萝卜基肥实验,氨挥发量的主要环境影响因子则是大气和土壤温度。而秋季追肥试验中氨挥发通量 4 对典型变量均未达到 5% 的显著水平,说明在红壤旱地秋季冬萝卜追肥试验中氨挥发通量相对受气象环境因素的影响较小,氨挥发主要受土壤本身性质和施肥量所决定的。

**2.3.1 影响春季种植马唐不同施氮量下红壤旱地氨挥发通量的环境因子分析** 每个施氮量处理下的氨挥发通量与对应的环境气象因子(大气温度、土壤温度、风速、蒸发量和气压)形成 1 对典型变量,春季种植牧草马唐试验,有 3 个施氮量处理,相应形成 3 对典型变量。从表 4 可见,春季种植马唐不同施氮量下红壤旱地氨挥发通量与气象因子间 3 对典型变量中第 1、2 对典型相关系数渐进的 F 值分别达到 1%、5% 的显著水平,构成这二对典型变量的线形组合分别为:

$$V_1 = 0.0148 \times x_1 - 0.0330 \times x_2 + 0.0305 \times x_3 - 0.9837 \times x_4 - 1.9727 \times x_5$$

$$W_1 = 0.0009 \times y_1 - 0.0831 \times y_2 + 1.0370 \times y_3$$

$$V_2 = 1.2452 \times x_1 - 1.1614 \times x_2 - 1.1049 \times x_3 + 24.3350 \times x_4 + 23.6302 \times x_5$$

$$W_2 = 1.1040 \times y_1 - 0.1304 \times y_2 + 0.3659 \times y_3$$

上述函数中  $V_1$ 、 $V_2$  代表环境气象因子的 2 个线性组合;  $W_1$ 、 $W_2$  代表不同施氮量红壤旱地氨挥发通

量的 2 个线性组合;  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$  分别代表环境气象因子中的大气温度、土壤温度、风速、蒸发量和气压;  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  分别代表不同施氮量(N90、N160、N230)下的氨挥发通量。

每对典型变量的线形组合由 1 个包括所有施氮处理氨挥发通量( $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ )的线形组合(V)和 1 个与氨挥发通量对应的环境气象因子( $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ )的线形组合(W)所组成,线形组合 V 和 W 中  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$  和  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$  的系数绝对值大小决定环境气象因子( $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ )中哪些因子对 N90、N160 和 N230 处理的氨挥发通量( $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ )中某个或某几个影响最大。上述函数关系可以看出,第 1 对线形组合  $V_1$  和  $W_1$ ,  $x_4$  和  $x_5$  是  $V_1$  中系数绝对值较大的,  $y_3$  是  $W_1$  中系数绝对值最大的。故气象因子中,负荷较大的有蒸发量  $x_4$  和气压  $x_5$ , 说明影响春季红壤旱地氨挥发的环境因素中蒸发量和气压影响最大,在施氮处理氨挥发通量中 N230 即  $y_3$  的负荷最大,表明环境气象因子中蒸发量和气压与红壤旱地种植马唐高氮肥(N230)处理下氨挥发通量的相关性较大,其典型相关系数渐进的 F 值达到 1% 的显著水平。根据 SAS 分析结果, N230 处理下氨挥发量的 41.37% 由 49.03% 的气象因子所贡献的;同理,第 2 对线形组合  $V_2$  和  $W_2$  中,负荷较大的为蒸发量  $x_4$  和气压  $x_5$ , 环境气象因子中仍然是蒸发量和气压为主导因子,在施氮处理中 N90 氨挥发通量值即  $y_1$  的负荷较大,表明气象因子中蒸发量和气压对低肥处理氨挥发的相关性也较大,其典型相关系数渐进的 F 值达到 1% 的显著水平。根据 SAS 分析结果, 54.77% 的气象因子对 65.58% 的 N90 处理下的氨挥发量做出贡献。气象因子对尿素处理 N160 氨挥发贡献较小。

表 4 春季种植牧草马唐不同施氮处理下红壤旱地氨挥发及环境因素间相关阵

Table 4 Correlations between environmental factors and ammonia volatilization in spring Smooth Crabgrass fields of red soil different in N application rate

|                         | 环境因素 Factor   |               |             |              |             | 不同施氮处理氨挥发通量 N rate |               |               |
|-------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|---------------|
|                         | 大气温度( $X_1$ ) | 土壤温度( $X_2$ ) | 风速( $X_3$ ) | 蒸发量( $X_4$ ) | 气压( $X_5$ ) | N90( $y_1$ )       | N160( $y_2$ ) | N230( $y_3$ ) |
| 大气温度 <sup>①</sup> $X_1$ | 1.000 0       | 0.834 5       | 0.238 6     | 0.201 9      | - 0.212 3   | - 0.120 0          | 0.125 0       | 0.217 1       |
| 土壤温度 <sup>②</sup> $X_2$ | 0.834 5       | 1.000 0       | 0.141 5     | 0.286 9      | - 0.294 3   | - 0.262 5          | 0.042 4       | 0.275 6       |
| 风速 <sup>③</sup> $X_3$   | 0.238 6       | 0.141 5       | 1.000 0     | 0.547 7      | - 0.550 1   | - 0.628 9          | 0.027 2       | 0.557 6       |
| 蒸发量 <sup>④</sup> $X_4$  | 0.201 9       | 0.286 9       | 0.547 7     | 1.000 0      | - 0.999 9   | - 0.266 6          | 0.417 4       | 0.996 6       |
| 气压 <sup>⑤</sup> $X_5$   | - 0.212 3     | - 0.294 3     | - 0.550 1   | - 0.999 9    | 1.000 0     | 0.269 7            | - 0.414 9     | - 0.996 7     |

①Air temperature; ②Soil temperature; ③Wind velocity; ④Evaporation capacity; ⑤Atmospheric pressure

**2.3.2 影响秋季种植冬萝卜不同施氮量下红壤旱地氨挥发通量的环境因子分析** 秋季冬萝卜基肥

处理试验中,红壤旱地氨挥发及环境因素的相关阵见表 5,经 SAS 典型相关分析,只有 1 对典型相关系

数渐进的 F 值达到 5% 的显著水平, 构成这对典型变量的线形组合为:

$$V_1 = -1.1489 \times x_1 + 1.6980 \times x_2 + 0.7366 \times x_3 - 0.58617 \times x_4 - 0.7745 \times x_5$$

$$w_1 = -0.3966 \times y_1 - 0.4000 \times y_2 - 0.8044 \times y_3 + 1.2499 \times y_4$$

可见, 负荷较大的有大气温度  $x_1$  和土壤温度  $x_2$ ,

说明影响氨挥发的气象环境因子中主要由大气温度和土壤温度所决定, 在施氮量四个处理中, 有 N250 处理下氨挥发通量值即  $y_4$  负荷较大, 其典型相关系数渐进的 F 值达到 5% 的显著水平。根据 SAS 分析结果, 在 N250 处理下, 有 19.31% 氨挥发量是由 28.54% 气象环境因子(主要是土壤温度和大气温度)所贡献的。这与江长胜等在室内培养和田间试验的结果<sup>[22]</sup>类似。

表 5 秋季冬萝卜基肥试验红壤旱地氨挥发及环境因素间相关阵

Table 5 Correlations between environmental factors and ammonia volatilization of basal fertilizer in autumn

|                         | 环境因素 Factor   |               |             |              |             | 不同施氮处理氨挥发通量 N Rate |               |               |               |
|-------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
|                         | 大气温度( $X_1$ ) | 土壤温度( $X_2$ ) | 风速( $X_3$ ) | 蒸发量( $X_4$ ) | 气压( $X_5$ ) | N70( $y_1$ )       | N130( $y_2$ ) | N190( $y_3$ ) | N250( $y_4$ ) |
| 大气温度 <sup>①</sup> $X_1$ | 1.000 0       | 0.756 4       | 0.360 4     | -0.197 7     | -0.081 3    | -0.450 3           | -0.538 7      | -0.080 2      | 0.094 5       |
| 土壤温度 <sup>②</sup> $X_2$ | 0.756 4       | 1.000 0       | 0.369 3     | 0.040 6      | 0.246 6     | -0.610 7           | -0.341 3      | -0.167 1      | 0.294 6       |
| 风速 <sup>③</sup> $X_3$   | 0.360 4       | 0.369 3       | 1.000 0     | 0.468 8      | 0.229       | -0.334 8           | -0.390 9      | -0.145 8      | 0.070 6       |
| 蒸发量 <sup>④</sup> $X_4$  | -0.197 7      | 0.040 6       | 0.468 8     | 1.000 0      | -0.269      | -0.271 8           | -0.138 9      | -0.341 0      | -0.140 0      |
| 气压 <sup>⑤</sup> $X_5$   | -0.081 3      | 0.246 6       | 0.229 3     | -0.269 8     | 1.000 0     | 0.148 0            | -0.038 8      | -0.037 4      | 0.061 9       |

①Air temperature; ②Soil temperature; ③Wind velocity; ④Evaporation capacity; ⑤Atmospheric pressure

表 6 秋季冬萝卜追肥试验红壤旱地氨挥发及环境因素间相关阵

Table 6 Correlations between environmental factors and ammonia volatilization of sidedressing fertilizer in autumn

|                          | 环境因素 Factor   |               |             |              |             | 不同施氮处理氨挥发通量 N Rate |               |               |               |
|--------------------------|---------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
|                          | 大气温度( $X_1$ ) | 土壤温度( $X_2$ ) | 风速( $X_3$ ) | 蒸发量( $X_4$ ) | 气压( $X_5$ ) | N70( $y_1$ )       | N130( $y_2$ ) | N190( $y_3$ ) | N250( $y_4$ ) |
| 大气温度 <sup>①</sup> $X_1$  | 1.000 0       | 0.415 3       | 0.011 6     | 0.268 0      | -0.013 3    | -0.071 5           | -0.179 1      | -0.154 4      | -0.148 2      |
| 土壤温度 <sup>②</sup> $X_2$  | 0.415 3       | 1.000 0       | 0.844 2     | 0.727 5      | -0.114 4    | 0.511 6            | 0.261 3       | 0.005 4       | 0.196 5       |
| 风速 <sup>③</sup> $X_3$    | 0.011 6       | 0.844 2       | 1.000 0     | 0.649 3      | -0.247 4    | 0.610 3            | 0.393 2       | 0.191 7       | 0.308 6       |
| 蒸发量 <sup>④</sup> $X_4$   | 0.268 0       | 0.727 5       | 0.649 3     | 1.000 0      | 0.169 0     | 0.569 6            | 0.234 6       | 0.102 4       | 0.292 9       |
| 土壤含水量 <sup>⑤</sup> $X_5$ | -0.013 3      | -0.114 4      | -0.247 4    | 0.169 0      | 1.000 0     | 0.269 2            | 0.319 9       | 0.488 2       | 0.444 7       |

①Air temperature; ②Soil temperature; ③Wind velocity; ④Evaporation capacity; ⑤Water capacity

致 谢 本试验得到中国科学院南京土壤研究所范晓晖副研究员的指点, 诚表感谢!

参 考 文 献

[ 1 ] 刘爱民, 封志明, 徐丽明. 现代精准农业及我国精准农业的发展方向. 中国农业大学学报, 2000, 5(2): 20~ 25. Liu A M, Feng Z M, Xu L M. The modern precision agriculture and technological system(In Chinese). Journal of China Agricultural University, 2000, 5(2): 20~ 25

[ 2 ] 沈善敏. 氮肥在中国农业发展中的贡献和农业中氮的损失. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 12~ 25. Shen S M. Contribution of nitrogen fertilizer to the development of agriculture and its loss in China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(Suppl.): 12~ 25

[ 3 ] 蔡贵信. 氨挥发. 见: 朱兆良, 文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科技出版社, 1992. 171~ 196. Cai G X. Ammonia volatilization. In: Zhu Z L, Wen Q X, eds. Nitrogen in Soil of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 171~ 196

[ 4 ] Cai G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China. Nutrition Cycle in Agroecosystem, 2000, 57: 67~ 73

[ 5 ] 葛晓光, 王晓雪, 付亚文. 长期定位施氮条件下菜田氮素循环的研究. 中国蔬菜, 1999 (1): 13~ 17. Ge X G, Wang X X, Fu Y W, et al. Studies on nitrogen cycle under experiment of long term, fixed position nitrogen application in vegetable field (In Chinese). China Vegetable, 1999(1): 13~ 17

[ 6 ] 朱兆良. 淹育土氮素的年转化及氮肥的有效管理. 土壤, 1992, 24(2): 97~ 114. Zhu Z L. Efficient management of nitrogen fertilizers for flood rice in relation to nitrogen transformation in flooded (In Chinese). Soils, 1992, 24(2): 97~ 114

[ 7 ] 田光明, 曹金留, 蔡祖聪. 镇江丘陵区稻田氨挥发损失研究. 南京大学学报. 1997. 268~ 270. Tian G M, Cao J L, Cai Z C. Study on the loss of ammonia volatilization from paddy field in Zheerjiang hilly region (In Chinese). Journal of Nanjing University, 1997. 268~ 270

[ 8 ] 艾绍英, 姚建武, 刘国坚, 等. 热带- 亚热带多雨湿润区旱地土

- 壤氨挥发研究. 中国农学通报, 1999, 15(6): 13~ 17. Ai S Y, Yao J W, Liu G J, *et al.* Study on ammonia loss by volatilization for fertilized to dry land in the tropics and subtropics(In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 1999, 15(6):13~ 17
- [ 9 ] 刘德林, 聂军, 肖剑.  $^{15}\text{N}$  标记水稻控释氮肥对提高尿素氮素利用率的研究. 激光生物学报, 2002, 11(2): 87~ 92. Liu D L, Nie J, Xiao J. Study on  $^{15}\text{N}$  labeled rice controlled release fertilizer in increasing nitrogen utilization efficiency(In Chinese). Acta Laser Biology Sinica, 2002, 11(2): 87~ 92
- [ 10 ] 曹金留, 田光明, 任立涛. 江苏南部地区稻麦两熟土壤中尿素的氨挥发损失. 南京农业大学学报, 2000, 23(4): 51~ 54. Cao L J, Tian G M, Ren L T. Ammonia volatilization from urea applied to the field of wheat and rice in southern Jiangsu Province (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 2000, 23(4): 51~ 54
- [ 11 ] 宋勇生, 范晓晖, 林德馨, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究. 土壤学报, 2004, 41(2): 265~ 269. Song Y S, Fan X H, Lin D S, *et al.* Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu lake region and its influencing factors (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 265~ 269
- [ 12 ] 王旭刚, 郝明德, 陈磊, 等. 长期施肥条件下小麦农田氨挥发损失的原位研究. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 18~ 24. Wang X G, Hao M D, Chen L, *et al.* In situ study of ammonia volatilization from wheat cropland under long term continuous fertilization (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 18~ 24
- [ 13 ] Cai G X, Chen D L, Ding H, *et al.* Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain. Nutrient Cycling in Agro ecosystems, 2002, 63: 187~ 195
- [ 14 ] Zhu Z L, Cai G X, Simpson J R, *et al.* Processes of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in north central China. Fert. Res., 1989, 18: 101~ 115
- [ 15 ] Zhang S L, Cai G X, Wang X Z, *et al.* Losses of urea nitrogen applied to maize grown on a calcareous fluvo aquic soil in north China. Pedosphere, 1992, 2: 171~ 178
- [ 16 ] 鲁如坤, 时正元. 红壤养分退化研究(II)- 尿素和碳铵在红壤中的转化. 土壤通报, 1995, 26(6): 241~ 243. Lu R K, Shi Z Y. Study on nutrition degeneration of red soil ( II)-Transformation of urea and ammonium bicarbonate in red soil ( In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(6): 241~ 243
- [ 17 ] 高鹏程, 张一平. 氨挥发与土壤水分散失关系的研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(6): 21~ 26. Gao P C, Zhang Y P. Research on relationship between volatilization of ammonia and evaporation of soil water. (In Chinese). Journal of Northwest Sci Tech University of Agriculture and Forestry(Natural Science Edition), 2001, 29(6): 21~ 26
- [ 18 ] 罗微, 茶正早, 屈明, 等. 转红壤中氨挥发特征研究初报. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 118~ 122. Luo W, Cha Z Z, Qu M, *et al.* Volatilization of ammonia from latosol soil after application of fertilizer(In Chinese). Journal of Agro Environment Science, 2005, 24(1): 118~ 122
- [ 19 ] 苏成国, 尹斌, 杨林章, 等. 太湖地区稻季氮肥的氨挥发损失及其防治措施. 西南农业学报, 2004, 17(增刊): 250~ 255. Su C G, Yin B, Yang L Z, *et al.* Ammonia volatilization and its prophylactic therapeutic measures of nitrogen fertilizer in Taihu region (In Chinese). Southwest China Journal of Agricultural Science, 2004, 17(Suppl.): 250~ 255
- [ 20 ] 曹兵, 李新慧, 张琳, 等. 冬小麦不同基肥施用方式对土壤氨挥发的影响. 华北农学报, 2001, 16(2): 83~ 86. Cao B, Li X H, Zhang L, *et al.* Effect of different basal dressing application methods on soil ammonia volatilization from winter wheat field(In Chinese). Acta Agricultural Boreali Sinica, 2001, 16(2): 83~ 86
- [ 21 ] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气的湿沉降. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1 884~ 1 888. Su C G, Yin B, Zhu Z L, *et al.* Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season(In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1 884~ 1 888
- [ 22 ] 江长胜, 魏朝富. 旱地土壤氨挥发损失及其影响因素研究. 土壤农化通报, 1998, 13(4): 121~ 127. Jiang C S, Wei C H. Study on ammonia volatilization and its influential factor in dry land soil(In Chinese). Chinese Journal of Soil Agro Chemistry Science, 1998, 13(4): 121~ 127

## AMMONIA VOLATILIZATION IN RELATION TO N APPLICATION RATE AND CLIMATE FACTORS IN UPLAND RED SOIL IN SPRING AND AUTUMN

Zhou Jing<sup>1,3</sup> Cui Jian<sup>2,3</sup> Wang Guoqiang<sup>1</sup> He Yuanqi<sup>3</sup> Ma Youhua<sup>2</sup>

(1 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 College of Graduate Student, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

(3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Ammonia volatilization in relation to N application rate and climate factors was studied through field experiment in red soil under the crop rotation of Smooth Crabgrass (*Digitaria ischaemum*) in spring and Winter Radish (*Raphanus sativus*) in autumn. Results indicate that ammonia volatilization in Treatments N90, N160 and N230 in spring dragged on for 10~ 17 days, and peaked at the 6th~ 8th day after urea application, reaching N 0.11, 0.57 and 1.84 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectively, and



the total amount of N loss through ammonia volatilization was N 0.67~ 5.16 kg hm<sup>-2</sup>, accounting for 0.74%~ 2.24% of the total N applied.

In autumn, in Treatments N70, N130, N190 and N250 (the ratio of basal and sidedressing is 7:3) ammonia volatilization occurred both after application of basal fertilizer and tillering fertilizer and lasted 10~ 11 days, with peaks reaching N 0.02, 0.05, 0.06 and 0.09 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for the basal fertilizer, and N 0.05, 0.22, 0.38 and 0.72 kg hm<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> for the tillering fertilizer respectively. The total amount of N loss through ammonia volatilization was N 0.37~ 3.04 kg hm<sup>-2</sup>, accounting for 1.31%~ 3.69% of the total N applied to Winter Radish (*Raphanus sativus*).

The total N loss through ammonia volatilization ( $y$ ) enhanced with the increase in N application rate ( $x$ ) ( $p < 0.05$ ) and expressed as  $y = 0.1576e^{0.0146x}$  and  $y = 0.1826e^{0.012x}$  respectively.

Meanwhile, for basal fertilizer application, the N flux and total N loss through ammonia volatilization in Spring and Autumn is significantly correlated with the climate factors, such as air temperature, atmospheric pressure, soil temperature and evaporation rate ( $p < 0.01$ ).

**Key words** Red soil; N rate; Ammonia volatilization; Climate factor