植物营养与肥料学报 2012,18(2):349-358
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同施氮量下双季稻连作体系土壤氨挥发损失研究

王 淳[1], 周 卫[1], 李祖章[2], 刘秀梅[2], 孙 刚[2], 夏文建[1,2], 王秀斌[1], 刘光荣[2*]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部植物营养与养分循环重点开放实验室,北京 100081;
2 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 南昌 330200)

摘要: 采用密闭室间歇通气法研究双季稻连作体系不同施氮量下土壤氨挥发损失。结果表明:早稻氨挥发损失主要发生在施肥后的 15d 内,第 3 ~ 5d 出现峰值,损失总量为 N 22.60 ~ 162.0 kg/hm^2,损失率为 29.29% ~ 52.32%;晚稻氨挥发主要发生在施肥后的 11d 内,第 3 d 出现峰值,损失总量为 N 22.35 ~ 141.4 kg/hm^2,损失率为 35.75% ~ 46.82%;早、晚稻各生育期及连作周期的氨挥发量均与施氮量呈显著线性关系。

关键词: 双季稻连作;水稻土;氨挥发;施氮量
中图分类号: S153.6+1;S147.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)02-0349-10

Effects of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy fields under double-harvest rice system

WANG Chun[1], ZHOU Wei[1], LI Zu-zhang[2], LIU Xiu-mei[2], SUN Gang[2], XIA Wen-jian[1,2], WANG Xiu-bin[1], LIU Guang-rong[2*]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS/Key Lab of Crop Nutrition and Fertilizer Science, MOA, Beijing 100081, China; 2 Institute of Soil and Fertilizer & Resources and Environment, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China*)

Abstract: An enclosed intermittent vent method was used to measure the ammonia (NH_3) volatilization from a paddy soil of double-harvest rice system under different application amounts of urea. The results show that the NH_3-N volatilization (NV) loss occurs mainly within 15 days, and the peak occurs during 3-5 days after the fertilization in the early rice season, and in the late rice season the NV loss occurs mainly within 11 days, and the peak appears in the third days after the fertilization. The total NV losses vary from N 22.60-162.0 kg/hm^2 and N 22.35-141.4 kg/hm^2 in the early and late rice seasons, respectively, and the percents of the losses to the applied N amounts range from 29.29%-52.32% and 35.75%-46.82%, respectively. The total NV losses and their percentages in all of the early rice, late rice or the double-harvest seasons are linearly increased with the increase of the urea application rates.

Key words: double-harvest rice system; paddy soil; ammonia volatilization; nitrogen application rate

氨挥发是水稻田(无论其土壤 pH 的高低)氮素损失的重要途径,其损失量可高达施氮量的 40%~50%[1],因此不合理的施氮量会带来大量的资源浪费,增加农业投入成本。氨挥发不仅是水稻田土壤氮素气态损失的一种机制,也是引起地表氮素富集的一条途径。土壤中挥发的气态氨与大气中的酸性漂浮物质以及云水滴中的 H_2SO_4 结合,生成 $(NH_4)_2SO_4$ 经由干湿沉降又重新进入陆地生态系统,进而导致土壤和水体中的氮素积累形成水体富营养化和土壤酸化[2];同时积累在大气中的氨还会

收稿日期: 2011-06-10　　**接受日期:** 2011-11-23
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201003059, 201003016);国家水稻产业技术体系课题;国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109307);国家科技支撑计划(2007BAD89B18);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助。
作者简介: 王淳(1986—),男,山东泗水人,硕士研究生,主要从事农田养分循环研究。E-mail: enslyde@163.com.
*通讯作者 Tel: 0791-7090357, E-mail: lgrtfs@sina.com

被氧化成 NO 和 N_2O 等气体,引起空气质量恶化以及温室效应[3]。所以从资源利用率和环境保护方面,科学合理控制水稻田氨挥发具有重要意义。

土壤氨挥发极易受气候、土壤、作物自身生理状况等自然因素和施肥措施、灌溉等人为因素的影响,在确定这些因素对土壤中 NH_3 挥发作用的影响方面前人已经做了大量工作。朱兆良等[4]研究结果表明,受土壤、田面水的 pH 和温度的交互影响,北方石灰性潮土的单季稻田和南方非石灰性水稻土上的双季晚稻田中氨挥发损失严重,而南方非石灰性水稻土上的单季稻田中则较低;在稻麦轮作体系下的氨挥发研究也多表现水稻季氨挥发量要大于小麦季[5-6];另有研究证实双季稻田土壤氨挥发速率短期内与田面水 NH_4^+ - N 的动态变化相一致,并有很好的正相关性[7-8];研究表明,氨挥发损失量表面撒施要大于以水带氮/无水层混施[5]、深施[9],黏土因其对 NH_4^+ 的吸附固定作用而使得氨挥发量要低于砂土条件[10],而施用碳酸氢铵的大于施尿素[11],有机肥或有机无机化肥配施[1]、工施用控释肥[12]或者各种抑制剂、采取节水灌溉[13]等可以减少氨挥发损失。迄今,有关不同施氮量对土壤氨挥发损失的影响在华北小麦-玉米轮作体系以及太湖地区稻麦轮作体系已经有了大量研究,而有关长江中下游地区主要的种植模式之一的双季稻连作体系还缺乏相关较为系统详尽的研究;基于此,本文研究了长江中下游典型的双季稻连作种植区(江西)在不同施氮量下土壤氨挥发特征,旨在明确该地区及双季稻连作种植体系下施氮量与土壤氨挥发损失量的关系,并可以为双季稻田优化施氮技术、提高氮肥利用率以及减少氮素损失对环境的影响提供理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设置在江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所南昌试验基地(23°21′14″N,115°54′25″E),该区属于亚热带湿润气候,海拔高度 20 m,平均气温 17.8℃,≧ 10℃ 积温 5432.2℃,无霜期长达 240 ~ 307d,年降水量 1662 mm,降水季节分配不均,全年降水 50% 以上集中在 4 ~ 7 月。供试土壤为第四纪红粘土发育的潮砂泥田土壤,土壤质地为壤土。主要种植模式为早稻—晚稻即双季稻连作模式。播前 0—20 cm 土壤有机质含量 26.25 g/kg,全氮 1.50 g/kg,硝态氮和铵态氮含量分别为 5.78 mg/kg和 14.13 mg/kg,有效磷 12.56 mg/kg,速效钾 124.83 mg/kg,pH 5.24,土壤容重为 1.07 g/cm^3。

1.2 试验设计

1.2.1 早稻田间试验 试验设置 6 个处理,施氮量分别为 N 0、60、120、180、240、300 kg/hm^2,以 N0、N60、N120、N180、N240、N300 表示;各小区磷、钾肥用量相同,为 P_2O_5 90 kg/hm^2、K_2O 150 kg/hm^2,磷肥全部做基肥,氮肥与钾肥均以 5∶2∶3 的比例分别做基肥、分蘖期和孕穗肥。氮、磷、钾肥分别用尿素(含 N 46.4%)、钙镁磷肥(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%)。小区面积 5 m × 6 m = 30m^2,3 次重复,随机区组排列。基肥为撒施后混入土壤,追肥为薄水表面撒施。各小区田埂用地膜覆盖以防串水串肥,单灌单排。田间管理如农药、除草剂等的应用与当地农民常规管理措施一致。2010 年早稻 4 月 1 日播种,5 月 9 日施基肥,混入土壤后,移栽抛秧,品种为春光 1 号,基本苗 30 × 10^4 株/hm^2,氮、钾肥追肥时间为 2010 年 5 月 23 日傍晚(分蘖肥)和 6 月 11 日傍晚(孕穗肥),7 月 19 日收获。

1.2.2 晚稻田间试验 早稻收割以后,各小区单独翻地,继续种植晚稻,施肥方式同早稻。种植品种为赣晚籼 37 号。2010 年 7 月 26 日下午施基肥,接着插秧,密度 20 cm × 20 cm,每穴两粒谷苗,秧苗氮、钾肥追肥时间分别为 2010 年 8 月 6 日傍晚(分蘖肥),9 月 6 日傍晚(孕穗肥),11 月 2 日收获。

1.3 氨气的捕获方法

本实验在田间原位采用密闭室间歇通气法[14]采集氨气,密闭室为由透明有机玻璃制成的底部开放的圆柱体,内径 20 cm,高 30 cm,室顶端有两个通气孔,一个为直径 30 mm 的通气孔,与离地面高 2.50 m(以减少田面空气中 NH_3 带来测定的影响)的 PVC 通气管相连;另一个通气孔(直径 12 mm)与装有硼酸吸收液(80 mL,H_3BO_3 20 g/L)的气体洗瓶相连(图 1),装置各连接口处用密封胶密封,并置于水中检验气密性。方法原理是利用真空泵抽气减压,使密闭室所覆盖土壤挥发的氨气随空气流动通过末端洗瓶被硼酸吸收固定,吸收液用标准酸(0.005 mol/L H_2SO_4)滴定并计算所吸收的氨量。换气速率为 16 ~ 20 次/min[9]。

土壤氨挥发于尿素施入后第 2、3、4、5、6、8、11、16 d 测定,直至各处理与对照无明显差异为止。每天 8:00 ~ 10:00 和 14:00 ~ 16:00 共抽气 4 h,作为当天氨挥发的平均值。每次抽气时同时记录田间气温和 5 cm 地温。

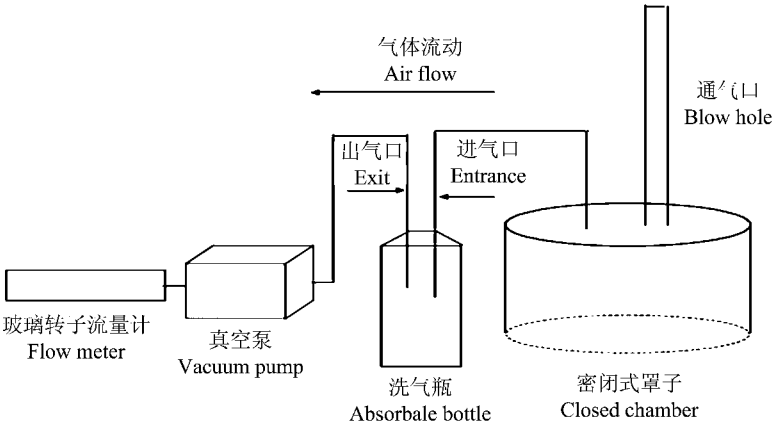

图 1　田间小区氨挥发收集装置示意图

Fig. 1　Sketch of NH_3 absorption equipment in the field plots

1.4　测定方法及计算

采用 0.005 mol/L H_2SO_4 滴定硼酸中所吸收的氨;土壤 NH_4^+ - N、NO_3^- - N 用 2 mol/L KCL 浸提,采用 SmartChem™200 discrete chemistry analyzer (West-Co Scientific Instruments, Brookfield, CT, USA)进行分析测定;土壤 pH 采用 1∶1 的土水比,电位计法测定;土壤有机质、速效磷、速效钾采用常规方法测定。

土壤氨挥发速率和土壤氨挥发累计损失量的计算公式如下:

$$V = \frac{(m - m_0)}{S} \times 6 \times 10$$

式中:V 为土壤氨挥发速率 [NH_3 -N kg/(hm^2·d)];m 为施肥处理吸收液中 NH_3 - N 的平均含量(g);m_0 为空白吸收液中 NH_3 - N 的平均含量(g);S 为密闭室面积(m^2);6 ×10 为换算系数。

$$F = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(V_i + V_{i-1}) \times (T_i - T_{i-1})$$

式中:F 为土壤氨挥发累计损失量(NH_3 -N kg/hm^2);n 表示施肥后测定的次数,T_i 即第 i 次测定施肥后的第 T_i 天(d);V_i 为第 i 次测定时氨挥发速率[N kg/(hm^2 · d)]。

采用 Excel 2003 和 SAS 8.01 软件对数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　早稻土壤氨挥发

2.1.1 早稻土壤氨挥发速率的动态变化　从整个早稻生育期来看(图 2),在施肥后各处理的氨挥发动态变化趋势基本一致,峰值主要出现在第 3 ~ 5 d,之后逐日下降,15 d 内基本损失殆尽。从各个处理来看,氨挥发速率及持续时间表现为随着施氮量的增加而增加,且氨挥发速率峰值均为基肥期 > 分蘖期 > 孕穗期。

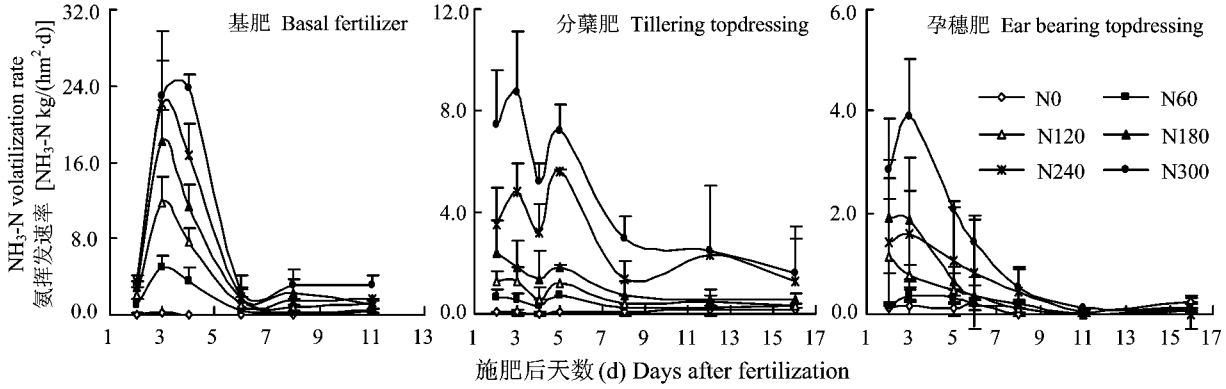

图 2　早稻土壤氨挥发损失速率

Fig. 2　NH_3 -N volatilization rate by soil during the early rice season

基肥时期,N300处理在第3和4 d的氨挥发速率均较高,分别为N 22.82、23.87 kg/(hm^2·d),第4 d并没有因为降水和温度下降的影响而减缓挥发速率,而其他处理均在第3 d达到峰值,N0、N60、N120、N180、N240处理氨挥发速率分别为N 0.2、4.82、11.86、18.24、22.13 kg/(hm^2·d),之后随着强降水及温度骤降,其挥发速率明显下降,第8 d气温及地温回升,氨挥发又出现一个较为平缓的排放曲线。本时期,气温及地温相对较低(图3),但随着春暖回温进入梅雨季节,雨量较多,在15 d内平均气温及5 cm平均地温分别为21.87、21.69℃,总降水量达到256.7 mm。

早稻分蘖期气温逐渐上升,但由于降水影响,温度变化幅度较大,最高平均温度比最低平均温度相差近7℃,平均气温和5 cm平均地温分别为23.95、23.90℃,本时期降水量相对较少,总量只有63.5mm(图3)。各处理土壤氨挥发速率在施肥后第3 d达到第一个峰值,N0、N60、N120、N180、N240处理氨挥发速率分别为N 0.07、0.58、1.29、1.85、4.80、8.72 kg/(hm^2·d),第4 d由于降水温度下降,氨挥发速率明显降低,第5 d白天晴天温度上升,氨挥发速率出现第2个峰值,各处理分别为N 0.11、0.74、1.17、1.81、5.62、7.21 kg/(hm^2·d),第6 d又突降大雨,温度骤降,但此后的氨挥发速率逐渐下降,大约持续16 d左右,各施肥处理间基本无差异。

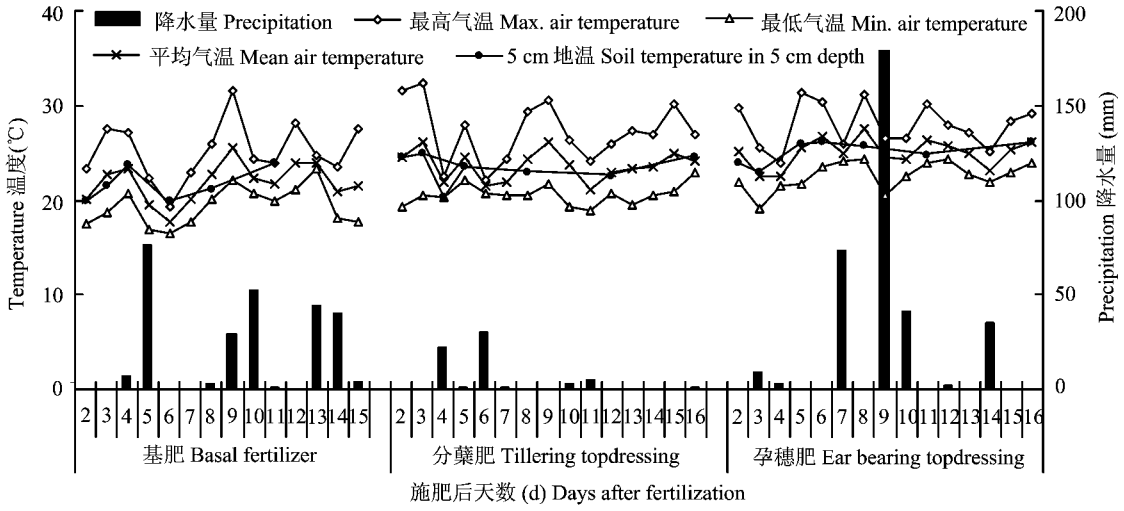

图3 早稻试验期间气温、5 cm地温及降水量

Fig. 3 Air temperature, soil temperature in 5 cm depth and precipitation during the early rice experiment period

孕穗期虽然平均气温和地温已经有所上升,平均气温及5 cm平均地温分别为25.05、25.09℃,但是此期间又迎来大量降水,对氨挥发产生很大影响。本时期较之前面两个时期氨挥发速率明显降低。各处理氨挥发速率在第3 d达到最大,其峰值仅为N 0.11(N0)、0.36(N60)、0.76(N120)、1.87(N180)、1.57(N240)、3.88(N300) kg/(hm^2·d)。之后逐渐下降,到第11d,氨挥发速率趋于零,各处理间无显著差异。

2.1.2 早稻土壤氨挥发累计损失量与损失率及与施氮量的拟合关系 从表1可以看出,各处理在不同施肥时期氨挥发累计损失的动态趋势基本一致,各施肥期损失量和总损失量均随着施氮量的增加而递增,并呈显著线性关系;各处理在早稻季氨挥发损失总量存在显著性差异;基肥、分蘖肥和孕穗肥三个时期的平均损失率(氨挥发损失量占总施氮量的百分比)分别为24.9%、12.1%及2.5%;整个早稻季氨挥发损失总量占施氮量的百分比经回归分析也表现极显著的线性关系。总的来看,在双季稻田生产系统中,早稻季氨挥发损失量一般占施氮量的29.3%~52.3%;从水稻生长的不同施肥时期来看,本次晚稻试验的基肥、分蘖肥和孕穗肥氨挥发平均损失比例(各处理氨挥发损失占总损失量的百分比的均值)分别为60.81%、29.67%和9.52%。

2.2 晚稻土壤氨挥发

2.2.1 晚稻土壤氨挥发速率的动态变化 整个晚稻生育期(图4),施肥后各处理的氨挥发动态趋势基本一致,峰值主要出现在第3 d,之后逐日下降,基肥时期持续最长,达到11 d左右,分蘖期和孕穗期施肥后8 d以内,氨挥发基本结束。整个晚稻生育

表 1　早稻各生育期施肥后的氨挥发累积损失量与损失率及其与施氮量的拟合方程

Table 1　Cumulative amount of NH_3 -N volatilization loss and loss rate after the fertilization and the relation of fitting between N application rate and NH_3 -N volatilization rate, loss during the early rice season

处理 Treatment	施肥后土壤氨挥发累计损失量(以纯氮计)[N kg/(hm²·d)] Cumulative amount of NH_3 -N volatilization loss after the fertilization				损失量占施氮量的比例 Percentage to N rate (%)
	施基肥后 Basal fertilizer	施分蘖肥后 Tillering topdressing	施孕穗肥后 Ear bearing topdressing	合计 Total	
N0	1.44	1.51	2.08	5.03	
N60	13.79 (20.6)	6.35 (8.1)	2.46 (0.6)	22.60 e	29.3
N120	31.38 (25.0)	9.95 (7.0)	4.29 (1.8)	45.63 d	33.8
N180	49.12 (26.5)	16.21 (8.2)	7.40 (3.0)	72.73 c	37.6
N240	61.67 (25.1)	41.81 (16.8)	7.89 (2.4)	111.4 b	44.3
N300	83.17 (27.2)	62.57 (20.4)	16.27 (4.7)	162.0 a	52.3
拟合方程 Equation	Y = 0.5429X - 0.6218	Y = 0.995X - 6.7847	Y = 0.1434X + 0.2802	Y = 0.5135X - 7.1263	y = 0.0942X + 22.511
R^2	0.9952	0.868	0.8416	0.9633	0.9762
P	< 0.01	< 0.05	< 0.05	< 0.01	< 0.01

注(Note): 括号内表示土壤氨挥发累计损失量占总施氮量的百分比 The number in parentheses indicates percentage of cumulative amounts of NH_3 -N volatilization loss by different treatments against the total N application rate in each stage; 同列数值后不同字母表示差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at the 5% level. X 代表施肥量 (N kg/hm²); Y 代表土壤氨挥发损失量 (NH_3 -N kg/hm²); y 代表土壤氨挥发损失率 (%); X represents N application rate (N kg/hm²); Y represents NH_3 -N volatilization loss; and y represent NH_3 -N volatilization loss of the total N applied.

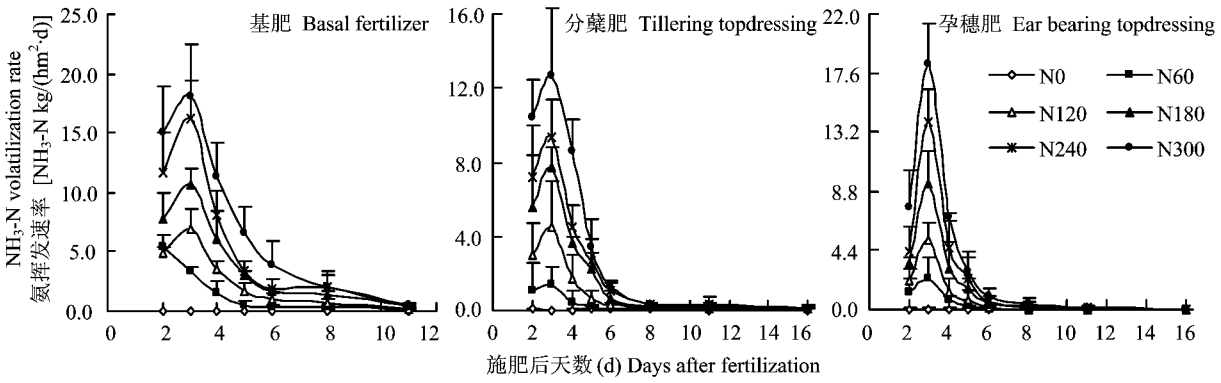

图 4　晚稻土壤氨挥发损失速率

Fig. 4　NH_3 -N volatilization rate by soil during the late rice period

期的气温和地温较高(图 5),而且降水量较早稻季节明显减少,对温度带来的波动性也比早稻小,虽然偶有强降雨出现,但对氨挥发强烈的时段里没有造成很大的影响。从各个处理来看,氨挥发速率及持续时间表现为随着施氮量的增加而增加,且氨挥发速率峰值表现为基肥期 > 孕穗期 > 分蘖期。

施用基肥后第 2d 氨挥发速率相对较高(图 4),在第 3d 达到峰值,各处理氨挥发速率为 N 0 (N0)、3.40 (N60)、7.00 (N120)、10.63 (N180)、16.17 (N240)、18.15 (N300) kg/(hm²·d) 之后逐渐降低,持续到第 11d 后各施肥处理无显著差异。基肥期间的平均气温、平均最高气温、平均最低气温和 5 cm 平均地温分别为 32.47、37.88、28.59 和 30.40℃(图 5),总降水量为 180.0 mm,其中第 11 d 降水量达到 139.0 mm,但此时土壤氨挥发速率已经很低,故影响也相对较小。

晚稻分蘖肥与基肥间隔较短,在施用基肥后第 12 d 开始施用分蘖肥。由于分蘖肥的施肥比例占

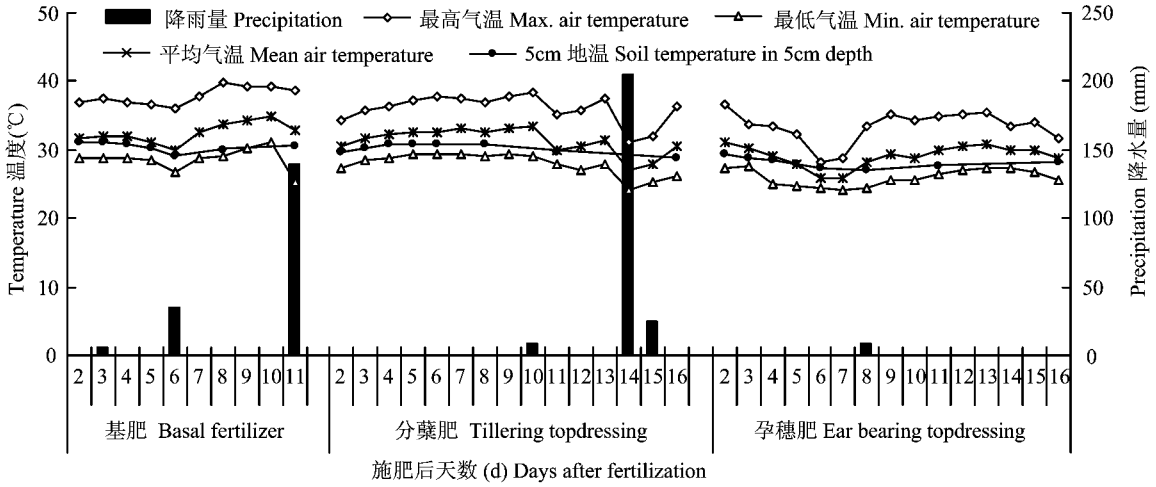

图5 晚稻试验期间气温、5 cm 地温及降水量

Fig. 5 Air temperature, soil temperature in 5 cm depth and precipitation during the late rice experiment season

总施氮量的20%,所以土壤氨挥发的速率也较之另两个时期有所下降。本时期各施肥处理土壤氨挥发速率的峰值出现在第3 d(图4),分别为N 0(N0)、1.43(N60)、4.52(N120)、7.73(N180)、9.39(N240)、12.66(N300) kg/(hm^2·d),之后逐渐降低,到第8d时,各处理间无明显差异。施肥后的前9 d温度变化趋势比较平稳(图5),平均气温、平均最高气温、平均最低气温和5 cm平均地温分别为32.35、36.70、28.86及30.49℃;之后几天,温度波动较大,主要是在第10、14、15 d出现强降雨,总量达到238.0 mm,但对土壤氨挥发速率没有产生很大影响。

晚稻孕穗期进入九月份,气温开始下降,16 d内平均气温、平均最高气温、平均最低气温和5 cm平均地温分别为29.12、33.38、25.95、28.09℃(图5);雨天也极少,只在第8 d有9.0 mm的降水。孕穗肥氮肥施用占总施氮量的30%,故较之分蘖期土壤氨挥发速率也提高不少。各施肥处理均在第3d达到最高(图5),峰值分别为N 0.03(N0)、2.28(N60)、5.18(N120)、9.38(N180)、13.89(N240)、18.33(N300) kg/(hm^2·d)。之后氨挥发速率迅速降低,第8 d后各处理未达显著差异水平。

2.2.2 晚稻土壤氨挥发累计损失量与损失率及与施氮量的拟合关系 从表2中可以看出,各处理在不同施肥时期氨挥发累计损失动态变化趋势基本一致,各施肥期损失量和总损失量均随着施氮量的增加而递增,并呈显著线性关系;各处理在晚稻季氨挥发损失总量存在显著性差异;基肥、分蘖肥和孕穗肥三个时期的平均损失率(氨挥发损失量占总施氮量的百分比)分别为19.7%、10.8%及10.1%;整个晚稻季氨挥发损失总量占施氮量的百分比经回归分析也表现极显著的线性关系。总的来看,在双季稻田生产系统中,晚稻季氨挥发损失量一般占施氮量的35.8%~46.8%;从水稻生长的不同施肥时期来看,本次晚稻试验基肥、分蘖肥和孕穗肥氨挥发平均损失比例(各处理氨挥发损失占总损失量的百分比的均值)分别为48.31%、27.13%和24.56%,可见氨挥发损失在移栽后的两周内所损失的氮素约占整个水稻生长周期的50%,因此在本时期,对减少氮素损失,提高氮素利用率仍存在着较大空间。

2.3 双季稻连作周期土壤氨挥发损失特征及与子粒产量的关系

整个双季稻连作周期(表3),不同施氮量处理土壤氨挥发损失总量在NH_3-N 5.93~303.4 kg/hm^2,肥料氮氨挥发损失率在32.5%~49.6%之间。对双季稻连作周期下氨挥发损失总量、损失率与施氮量拟合关系,得出:Y(氨挥发损失总量N, kg/hm^2) = 0.5356X - 38.318, R^2 = 0.9845(P < 0.01);y(氨挥发损失率,%) = 0.0357X + 27.209, R^2 = 0.9825(P < 0.01),由此可见,双季稻连作体系中土壤氨挥发损失量、损失率均随着施氮量的增加而呈显著的正向线性关系。

在作物产量上,与不施氮处理相比,早稻各施氮处理分别增产26.39%(N60)、52.16%(N120)、54.78%(N180)、52.41%(N240)、47.95%(N300);晚稻分别增产9.599%(N60)、15.18%(N120)、21.57%(N180)、18.72%(N240)、19.54%(N300)。

表 2　晚稻各生育期施肥后的氨挥发累积损失量与损失率及其与施氮量的拟合方程

Table 1　Cumulative amount of NH_3 -N volatilization loss and loss rate after the fertilization and the relation of fitting between N application rate and NH_3 -N volatilization rate, loss during the late rice season

处理 Treatment	施肥后土壤氨挥发累计损失量(以纯氮计)[N kg/(hm²·d)] Cumulative amount of NH_3 -N volatilization loss after fertilization				损失量占施氮量的比例 Percentage to N rate (%)
	施基肥后 Basal fertilizer	施分蘖肥后 Tillering topdressing	施孕穗肥后 Ear bearing topdressing	合计 Total	
N0	0.13	0.58	0.18	0.90	
N60	12.13 (20.0)	5.23 (7.7)	4.99 (8.0)	22.35 e	35.8
N120	22.86 (18.9)	11.61 (9.2)	9.81 (8.0)	44.28 d	36.2
N180	34.23 (18.9)	22.46 (12.2)	18.64 (10.3)	75.33 c	41.4
N240	47.83 (19.9)	29.35 (12.0)	27.25 (11.3)	104.4 b	43.1
N300	62.83 (20.9)	39.70 (13.0)	38.82(12.9)	141.3 a	46.8
拟合方程 Equation	Y = 0.4114X - 0.8535	Y = 0.6637X - 1.7542	Y = 0.4267X - 2.5861	Y = 0.4665X - 5.1939	y = 0.0485X + 31.907
R^2	0.9961	0.9855	0.9722	0.993	0.9533
P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

注(Note):括号内表示土壤氨挥发累计损失量占总施氮量的百分比 The number in parentheses indicates percentage of cumulative amount of NH_3 -N volatilization loss by different treatments against the total N application rate in each stage;同列数值后不同字母表示差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at the 5% level. X 代表施肥量 (N kg/hm²);Y 代表土壤氨挥发损失量(NH_3 -N kg/hm²);y 代表土壤氨挥发损失率(%);X represents N application rate (N kg/hm²);Y represents NH_3 -N volatilization loss;and y represent NH_3 -N volatilization loss of the total N applied.

表 3　双季稻连作周期土壤氨挥发损失及子粒产量

Table 3　NH_3 -N volatilization loss in double-harvest rice season and grain yield

处理 Treatment	双季稻连作周期土壤氨挥发损失量 NH_3 -N volatilization loss in double-harvest rice season		子粒产量(kg/hm²) Grain yield		增产率(%) Increasing yield	
	损失总量(早稻季+晚稻季) Tot. amount of NH_3 -N volatilization loss(Early rice + Late rice) (NH_3 -N kg/hm²)	损失总量占施氮量的比例 Percentage to N rate (%)	早稻季 Early rice	晚稻季 Late rice	早稻季 Early rice	晚稻季 Late rice
N0	5.93 f	—	4136 ± 399 c	6151 ± 470 c	—	—
N60	44.95 e	32.52	5657 ± 203 b	6741 ± 200 bc	26.39	9.59
N120	89.91 d	34.99	6810 ± 267 a	7085 ± 207 ab	52.16	15.18
N180	148.1 c	39.48	6927 ± 90 a	7478 ± 238 a	54.78	21.57
N240	215.8 b	43.78	6821 ± 93 a	7302 ± 544 ab	52.41	18.72
N300	303.4 a	49.57	6621 ± 128 a	7124 ± 358 ab	47.95	19.54

注(Note):表中产量数据为3个重复的平均值±标准差 The data of yield are mean ± SD(n=3);同列数值后不同字母表示差异达到5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant at the 5% level.

可见,作物产量并非随着施氮量的增加而增加,反而达到一定最高值后有持平或下降趋势;另由表 1 我们已经得出施氮量与早稻氨挥发损失总量呈显著的正向线性关系,即施氮量越高氨挥发越高(如图 6)。因此当产量达到最大,此时对应的氨挥发损失量并非最大,即满足较高经济效益的最佳施氮量也可以认为其有较好的环境效益。利用线性加平台模型[15]拟合氨挥发损失量与作物产量的关系,早稻季

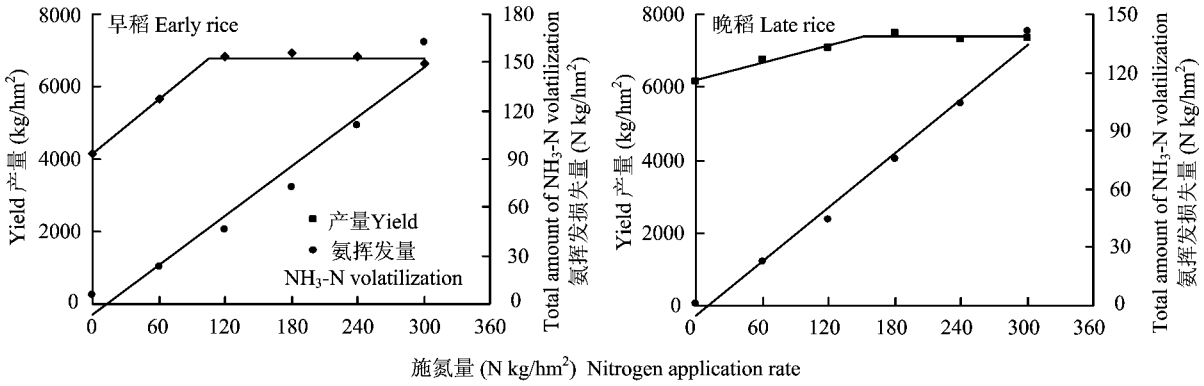

图6 早稻和晚稻季施氮量与产量、氨挥发损失量的关系

Fig. 6 Relationship of nitrogen application rate with yield and total amount of NH_3-N volatilization loss in early rice and late rice season

为 y = 25.316x + 4136.8 (x < 105), y = 6795 (x > 105), R^2 = 0.9896,即早稻最佳产量施氮量为 N 105 kg/hm²,作物产量可以达到 6795 kg/hm²;晚稻拟合模型为 y = 7.8026x + 6192(x < 152), y = 7378 (x > 152), R^2 = 0.9786,即晚稻最佳产量施氮量为 N 152 kg/hm²,作物产量可以达到 7378 kg/hm²。

3 讨论与结论

研究报道 NH_3 的损失速率取决于 NH_3(水)和溶液上方大气中 NH_3(P_{NH3})之间的分压差,由于空气中的 NH_3 的浓度很低而且相对恒定,所以 NH_3(水)的浓度便起到直接主导作用。在长期淹水的稻田中,土壤氨挥发显著受到气候因素(温度及降水)的影响[16]。朱兆良[4]的研究表明在江苏和浙江的非石灰性水稻土中田面水的 pH 低于 8 或 8 左右,尿素的氨挥发损失率只有 9 ~ 11%,而其在江西鹰潭非石灰性水稻土的双季晚稻的试验结果表明,虽然水面 pH 在 8 左右与江浙两地相近,但是氨挥发损失率高达 40%,分析其主要原因是日间光照强烈,田面水温很高(高达 40℃),尿素水解迅速,促进了氨挥发损失。由此可见,在南方稻田,因日照光强造成的很高的田面水温对氨挥发的影响要远远大于田面水 pH 的作用,各种因素因时空变异而表现的主导作用是不同的。作为双季稻主产区的江西,晚稻季雨水相对较少,而早稻季多降水,而且这个时期的温度受降水的影响变异性也很大(图 3),因此其对氨挥发持续时间带来很大影响。吴萍萍等[7]研究发现,氨挥发损失早稻持续 14 d 左右,晚稻为 7d 左右;李菊梅[1]等研究显示,早稻氨挥发持续 20 d 左右,晚稻季持续 9 ~ 10 d。本研究结果表明,该地区早稻季土壤氨挥发持续时间为 11 ~ 15d,而晚稻的持续时间为 6 ~ 8d,早稻季比晚稻季持续时间长,其主要原因可能是晚稻季的平均温度(30.82℃)比早稻季的平均温度(23.57℃)高,水分蒸发速率大,田间水中的 NH_3(水)的分压大,使得氨挥发主要集中发生在较短的时间内。

从氨挥发损失量看,李菊梅[1]等的研究表明,早、晚稻施尿素 (NPK, N 150 kg/hm²)处理的氨挥发损失率达 41.4% 和 39.9%;管建新[17]等在 2005 ~ 2008 年 4 年试验中,双季总施氮量 N 300 kg/hm² 处理在连作周期的氨挥发损失率分别为 41.3%、40.7%、38.8% 和 38.8%;本研究结果显示,早、晚稻氨挥发损失量相差不大(表 3),早稻略高一点,但基本上各占总损失量的 50%,早稻施肥处理氨挥发损失量为 N 22.60 ~ 162.0 kg/hm²,损失率为 29.29% ~ 52.32% (表 1);晚稻施肥处理氨挥发损失量为 N 22.35 ~ 141.4 kg/hm²,损失率为 35.75% ~ 46.82% (表 2),整个连作周期的氨挥发损失率为 32.52% ~ 49.57% (表 3)。本研究结果与上述两人的研究在相似条件的处理相近并均与朱兆良[18]等利用微气象学质量平衡法的观察结果相一致;而吴萍萍等[7]施用 NPK 肥的处理其早、晚稻损失率分别为 13.2% 和 16.9%;王国强[19]相近处理氨挥发损失率早稻为 7.29% ~ 7.71%,晚稻为 12.07% ~ 29.95% 均比本研究结果低很多,其可能是由于本研究在施肥方式上采用了表面撒施以及很高的田面水温,是这两个因素双重作用的结果。

本研究中施肥量与氨挥发损失量的关系显示,在一定的施氮范围内,同一个生育阶段,随着施氮量的增加氨挥发损失量是递增的;早、晚稻及整个

稻—稻连作周期氨挥发损失量、损失率均与施氮量呈线性增长关系，这与邓美华等[5]研究的太湖地区稻—麦轮作体系及董文旭等人研究[20-21]的华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系的研究结果相一致。

由此可见，长江中下游地区双季稻连作体系的农田氨挥发损失是肥料氮素损失的重要途径，过量施肥会增加肥料氮素氨挥发损失，从而降低了氮肥利用率以及对环境产生一定危害。本研究为下一步进行优化施氮，减少氮肥用量及损失，实现生态与经济效益双赢提供了重要依据。

参 考 文 献：

[1] 李菊梅，李冬初，徐明岗，等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境，2008，17(4)：1610-1613.
Li J M, Li D C, Xu M G *et al*. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. Ecol. Environ., 2008, 17(4): 1610-1613.

[2] Willem a H Asman, Mark A Sutton, Jan k Schjφrring. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition[J]. New Phytol., 1998, 139(1): 27-48.

[3] Martin F. Atmospheric ammonia and ammonium transport in Europe and critical loads: a review [J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 1998, 51(1): 5-17.

[4] 朱兆良. 稻田土壤中氮素的转化与氮肥的合理施用[J]. 化学通报，1994，(9)：15-18.
Zhu Z L. Nitrogen transformation and rational application nitrogen fertilizer in paddy soil[J]. Chem. Online., 1994, (9): 15-18.

[5] 邓美华，尹斌，张绍林，等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响[J]. 土壤，2006，38(3)：263-269.
Deng M H, Yin B, Zhang S L *et al*. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields[J]. Soil, 2006, 38(3): 263-269.

[6] 夏文建，周卫，梁国庆，等. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报，2010，6(1)：6-13.
Xia W J, Zhou W, Liang G Q *et al*. Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from paddy field under wheat-rice rotation system. [J]. Plant Nutr. Fert. Sci, 2010, 6(1): 6-13.

[7] 吴萍萍，刘金剑，杨秀霞，等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氨挥发的影响[J]. 中国水稻科学，2009，23(1)：85-93.
Wu P P, Liu J J, Yang X X *et al*. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice cropping field in red soil region. [J]. Chin. J. Rice Sci., 2009, 23(1): 85-93.

[8] 张静，王德建. 太湖地区乌栅土稻田氨挥发损失的研究[J]. 中国生态农业学报，2007，11(15)：84-87.
Zhang J, Wang D J. Ammonia volatilization in gleyed paddy fields oils of Taihu Lake region[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2007, 11(15): 84-87.

[9] 邹长明，颜晓元，八木一行. 淹水条件下的氨挥发研究[J]. 中国农学通报，2005，21(2)：167-170.
Zou C M, Yan X Y, K Yagi. Measurements of ammonia volatilization from paddy soils. [J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2005, 21(2): 167-170.

[10] 叶世超，林忠成，戴其根，等. 施氮量对稻季氨挥发特点与氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学，2011，25(1)：71-78.
Ye S C, Lin Z C, Dai Q G *et al*. Effects of nitrogen application rate on ammonia volatilization and nitrogen utilization in rice growing season. [J]. Chin. J. Rice Sci., 2011, 25(1): 71-78.

[11] 蔡贵信，朱兆良，朱宗武，等. 水稻田中碳铵和尿素的氮素损失的研究[J]. 土壤，1985，(5)：225-229，256.
Cai G X, Zhu Z L, Zhu Z W *et al*. The study of nitrogen losses from ammonia bicarbonate and urea in paddy field. [J]. Soils, 1985, (5): 225-229,256.

[12] 孙克君，毛小云，卢其明，等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报，2004，15(12)：2347-2350.
Sun K J, Mao X Y, Lu Q M, *et al*. Mitigation effect of several controlled-release N fertilizers on ammonia volatilization and related affecting factors [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(12): 2347-2350.

[13] 彭世彰，杨士红，徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报，2009，(8)：35-39.
Peng S Z, Yang S H, Xu J Z, *et al*. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation. [J]. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng., 2009, (8): 35-39.

[14] 李鑫，巨晓棠，张丽娟，等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报，2008，19(1)：99-104.
Li X, Ju X T, Zhang L J *et al*. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2008, 19(1): 99-104.

[15] 贾良良，陈新平，张福锁，等. 北京市冬小麦氮肥适宜用量评价方法的研究[J]. 中国农业大学学报，2001，6(3)：67-73.
Jia L L, Chen X P, Zhang F S *et al*. Study of optimum N supplying rate in winter wheat in beijing area. [J]. J. China Agric. Univ., 2001, 6(3): 67-73.

[16] Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils [M]. Madison, Wis.: American Society of Agronomy. 1982.

[17] 管建新，王伯仁，李冬初. 化肥有机肥配合对水稻产量和氮素利用的影响[J]. 中国农学通报，2009，25(11)：88-92.
Guan J X, Wang B R, Li D C. Effect of chemical fertilizer applied combing with organic manure on yield of rice and nitrogen using efficiency[J]. Chin. Agric. Sci. Bull., 2009, 25(11): 88-92.

[18] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境[J]. 土壤学报，2002，

39(增刊): 3-11.
Zhu Z L. Nitrogen management in relation to food production and environment in China[J]. Acta Pedol. Sin., 2002, 39(Suppl): 3-11.

[19] 王国强. 典型红壤地区不同水肥组合下稻田氮素平衡的研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士论文, 2007.
Wang G Q. Study on the paddy nitrogen balance under different n and water coupling in typical red soil areas [D]. Nanjing: MS thesis, Nanjing Agricultural University, 2007.

[20] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 16(3): 46-48.
Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. In situ determination of ammonia volatilization in field of North China[J]. Chin. J. Eco-Agric., 2006, 16(3): 46-48.

[21] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 415-421.
Yang S L, Zhu A N, Zhang J B *et al*. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. Arid Zone Res., 2010, 27(3): 415-421.