植物营养与肥料学报 2009,15(2):344-351
Plant Nutrition and Fertilizer Science

优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米轮作体系的土壤氨挥发

王秀斌,周 卫*,梁国庆,裴雪霞,夏文建,孙静文
(中国农业科学院农业资源与区划研究所,农业部植物营养与养分循环重点开放实验室,北京 100081)

摘要:采用密闭室间歇通气法研究优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米体系的土壤氨挥发损失。结果表明,肥料氮素氨挥发损失主要发生在施肥后的 14 d 内,冬小麦和夏玉米两个生长季氨挥发损失总量及其损失率均表现出随施氮量的降低而降低,玉米季氨挥发损失高于小麦季。习惯施肥小麦季和玉米季氨挥发总量是氮肥减量后移的 2.28 和 2.03 倍,而氮肥减量后移处理的小麦和玉米产量显著高于习惯施肥。氮肥后移可节省氮肥 30%,是降低氨挥发损失的理想施肥方式。

关键词:冬小麦;夏玉米;优化施肥;土壤氨挥发
中图分类号:S153.6;S344.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2009)02-0344-08

Effect of optimized nitrogen application on ammonia volatilization from soil in winter wheat-summer corn rotation system in Northern China

WANG Xiu-bin, ZHOU Wei*, LIANG Guo-qing, PEI Xue-xia, XIA Wen-jian, SUN Jing-wen
(*Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, CAAS/*
Key Laboratory of Plant Nutrition and Nutrient Cycling, MOA, Beijing 100081, China)

Abstract: An enclosed intermittent vent method was adopted to determine ammonia volatilization (AV) from soil of winter wheat-summer corn rotation system in North China. Results showed that AV from soil in both winter wheat and summer corn growing season occurred mainly within 14 days after fertilization, and the cumulative AV amount from fertilizer N in winter wheat growing season was found to be less than that in summer corn growing season. Cumulative AV amounts from soil of winter wheat-summer corn rotation system were observed to be reduced with decreasing of N application rate. Total AV amounts under conventional fertilization were 2.28 and 2.03 times as high as that under optimized N fertilization, where N application rate was decreased by 30%. Compared with conventional fertilization (N 300 kg/ha), the N rate was decreased by postponing N application, but the grain yield was significantly increased. Therefore, 30% of nitrogen fertilizer could be expected to be saved by optimized fertilization, and postponing N application is a rational and practicable N fertilization method for reducing AV in winter wheat-summer corn rotation system.

Key words: winter wheat; summer corn; optimized fertilization; soil ammonia volatilization

化肥是农田生态系统的主要氮素来源。华北平原小麦和玉米中高产区氮肥用量已远远超过全国氮肥平均用量,据调查,北京、山东、河北小麦/玉米轮作体系氮肥平均用量高达 N 500~600 kg/hm^2[1],过量施肥现象十分突出,远远超过作物氮素需求,由此导致肥料氮素损失严重,肥料利用率低。

氮肥施入土壤-作物体系后,其基本归宿主要有 3 个方面:一是被作物吸收;二是在土壤剖面中以无机氮形态或有机结合形态残留;三是以各种形式损失。氨挥发是农田氮素损失的重要途径[2-3],

收稿日期:2008-10-08　　**接受日期**:2008-11-28
基金项目:国家重点基础研究发展计划课题(2007CB109307);国家科技支撑计划课题(2006BAD25B01);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:王秀斌(1975-),男,山西偏关人,博士研究生,主要从事养分循环方面的研究。E-mail:wangxb128@163.com
* **通讯作者** Tel:010-82108671, E-mail:wzhou@caas.ac.cn

肥料氮的氨挥发损失率因施肥量、施肥时间和施肥方式不同而不同[4-8]。朱兆良等采用微气象学方法研究了我国水生生态系统的土壤氨挥发,发现石灰性水稻土尿素和碳铵的氨挥发损失分别高达 30% 和 39%,而酸性水稻土仅为 9% 和 18%[9]。说明除肥料品种外,土壤酸碱特性是决定氨挥发数量高低的重要因素,pH 高于 7 的石灰性土壤更有利于氨挥发。在北京地区研究表明,以尿素作氮源将肥料混施入 0—10 cm 土壤或撒施后立即灌水的条件下,冬小麦/夏玉米轮作体系中通气法测得氨挥发损失率 4%～7%[10]。采用密闭室间歇式通气法测定氨挥发,发现水稻施肥后氨挥发持续的时间短,主要发生在施肥后 1 周以内,稻季和麦季的基肥阶段是主要的氨挥发时期,占各自氨挥发损失 N 的 50% 左右,优化施肥能明显降低稻 – 麦轮作系统中的氨挥发损失[11],稻田氨挥发损失占施氮量的 4%～10%[12]。有关华北小麦/玉米轮作体系氮肥后移下氨挥发损失研究较少。

氨挥发研究方法主要有土壤平衡法[13],箱法(Chamber methods)[14-15]和微气象法[16]。土壤平衡法误差大,微气象法要求研究区域大,不适合田间小区试验。尽管箱内条件与外界环境差异较大,但箱法(静态或动态闭路箱法)简单易行,在田间小区试验中的应用受到重视[17]。本文拟采用一种密闭室间歇通气的动态闭路箱法,研究氮肥减施与后移对华北冬小麦/夏玉米轮作体系农田土壤氨挥发的影响,为建立优化施肥技术和提高氮肥利用率提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域与供试土壤

试验于 2007 年 10 月至 2008 年 10 月在河北省农林科学院旱作所衡水试验站(38.01°N,115.32°E)进行。该区属北温带季风半湿润气候,年平均气温 12.6℃,无霜期 188 d,全年降水多集中在 6～9 月份,2007 和 2008 年降水量分别为 393.4 和 459.7 mm,主要种植方式为冬小麦/夏玉米轮作。供试土壤为潮土,播前 0—20 cm 土壤有机质含量 11.7 g/kg,硝态氮和铵态氮含量分别为 12.14 和 0.76 mg/kg,速效磷 5.8 mg/kg,速效钾 103 mg/kg,pH 8.6,土壤容重 1.40 g/cm^3。

1.2　试验设计

冬小麦田间试验。基于该区域冬小麦施肥状况调查进行试验设计。该区按目标产量 6750 kg/hm^2 以及氮肥利用率 40% 计算,优化施氮量应为 N 210 kg/hm^2[(目标产量 – 无氮区产量) × 形成 100 kg 子粒的吸氮量/0.4/100],无氮区产量 4000 kg/hm^2,100 kg 子粒吸氮量(N)3.00 kg,而该地区农民的习惯施氮量高达 N 300 kg/hm^2;同时发现苗期～拔节期,拔节期～孕穗期,以及孕穗期～成熟期小麦吸氮量大约各占总吸氮量的 1/3,而农民的习惯施氮处理则是底肥和拔节肥各半。基于此,试验设 4 个处理:(1)不施氮肥(N0,对照),(2)习惯施氮(N300/2,N 300 kg/hm^2 分两次施用,基肥与拔节肥各半),(3)氮肥减量(N210/2,N 210 kg/hm^2 分两次施用,基肥与拔节肥各半),(4)氮肥减量后移(N210/3,N 210 kg/hm^{2}分三次施用,基肥,拔节肥和孕穗肥各占 1/3)。各小区磷、钾肥用量相同,分别为 P_2O_5 150 kg/hm^{2}和 K_2O 90 kg/hm^2,全部做底肥一次施入。小区面积 9.5 m × 8 m,随机区组排列,三次重复。氮、磷、钾肥料分别为尿素(N 46.4%),过磷酸钙(P_2O_5 17%),氯化钾(K_2O 60%)。底施氮肥(2007 年 10 月 21 日晚 6 点)、拔节肥(2008 年 4 月 12 日晚 6 点)和孕穗肥(2008 年 4 月 25 日晚 6 点)按试验设计均匀撒施后采用畦灌方式灌水,每次灌水量为 600 m^3/hm^2。选用节水高产型小麦衡观 35。整地时前茬玉米秸秆全部移出。10 月 22 日播种,基本苗 150 × 10^4 株/hm^2,田间管理同当地高产田一致,6 月 12 日收获。

夏玉米田间试验。在冬小麦田间试验同一块地的另一半开展研究。基于区域夏玉米施肥状况调查进行试验设计。该区域按目标产量 9000 kg/hm^2 以及氮肥利用率 40% 计算,优化施氮量应为 N 168 kg/hm^2[(目标产量 – 无氮区产量) × 形成 100 kg 子粒的吸氮量/0.4/100],无氮区产量 6750 kg/hm^2,100 kg 子粒吸氮量 3.00 kg,而该地区农民的习惯施氮量高达 N 240 kg/hm^2;同时发现苗期～拔节期,大喇叭口期～吐丝期,以及灌浆期～成熟期玉米吸氮量大约各占总吸氮量的 1/5,3/5 和 1/5,而农民的习惯施氮处理则是底肥和大喇叭口肥为 1∶2,在大喇叭口期仅追肥一次可能导致氮素氨挥发损失较大。基于此,试验设 4 个处理,(1)不施氮肥(N0,对照),(2)习惯施氮(N240/2,N 240 kg/hm^2 分两次施用,基肥 1/3,大喇叭口肥 2/3),(3)氮肥减量(N168/2,N 168 kg/hm^2 分两次施用,基肥 1/3,大喇叭口肥 2/3),(4)氮肥减量后移(N168/3,N 168 kg/hm^2 分三次施用,基肥、大喇叭口肥和吐丝肥各占 1/5、3/5 和 1/5)。不施磷肥,钾肥用量各小区相同,为 K_2O 90 kg/hm^2,

全部做底肥一次施入。品种为郑单958。行株距50 cm×30 cm。生育期间按试验设计分别在底施氮肥(6月19日晚6点)、大喇叭口期追肥(7月29日晚6点)和吐丝期追肥(8月14日晚6点)后采用畦灌方式灌水,每次灌水量为600 m^3/hm^2,9月24日收获。小区面积9.5 m×8 m,随机区组排列,三次重复。氮肥和钾肥的施用与小麦季一致。

1.3 氨气的捕获方法

基于评估生育期间的氨挥发总量,试验期间每隔15d测定土壤氨挥发速率,施肥后加密测定。氨挥发的田间原位测定采用密闭室间歇式通气法[18],原理是利用真空泵减压抽气使罩子内土壤挥发出的氨(NH_3)随气流通过装有2%硼酸的洗气瓶,使其吸收于硼酸溶液中,收集溶液待测。所用密闭室装置由有机玻璃罩密闭室(高25 cm,直径15 cm)、2.5 m高的PVC管、白色乳胶管、250 mL容量洗气瓶和转速为5500 r/min的真空泵组成(图1)。测定时,用玻璃转子流量计测定真空泵流量,抽气速率为-8 L/s。施肥后第2、3、4、5、6、9和14 d测定,直至各处理间的氨挥发速率无明显差异为止。每天7:30~10:30和15:00~18:00共测定6 h,作为整天氨挥发的平均值,然后换算成每天的氨挥发量。测定时,将罩子扣入土壤表面5 cm深,随机放置在各小区内。

1.4 测定方法

采用0.01 mol/L硫酸滴定硼酸中所吸收的氨;土壤NH_4^+-N和NO_3^--N采用1 mol/L KCl浸提,连续流动注射分析仪(TRAACA 2000,德国产)测定;土壤pH采用1:1的土水比,电位计法测定;土壤有机质、有效磷、速效钾浓度采用常规方法测定。

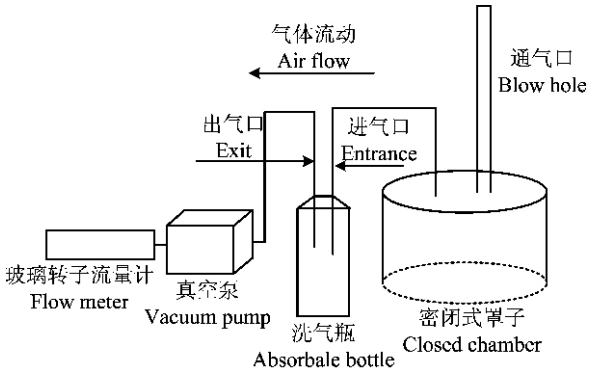

图1 田间小区氨挥发收集装置示意图

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

1.5 数据处理

采用Excel 2003和SAS 6.0软件对数据进行方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 冬小麦季土壤氨挥发速率

基于试验期间每15 d测定土壤氨挥发速率,以及施肥后的加密测定,发现土壤氨挥发主要发生在施肥后14 d内(图2)。小麦季氮肥基施后,气温相对较低,在14 d内最高、最低平均气温分别为18.4℃和6.9℃,13 d内降雨量少(图3)。土壤氨挥发速率逐渐增大,至施肥后第3 d,各处理的氨挥发速率均达最大值,不施氮肥(N0)、习惯施肥(N300/2)、氮肥减量(N210/2)和氮肥减量后移(N210/3)处理的峰值分别为N 0.18、1.13、0.65和0.41 kg/(hm^2·d),此后迅速降低。14 d后,各小区的氨挥发速率已无明显差异,介于N 0.04~0.10 kg/(hm^2·d)之间。

拔节期追肥后14 d内最高、最低平均气温分别为24.4℃和9.9℃,13 d内降水量极少(图3)。土壤氨挥发速率在施肥灌水后逐渐增大,至施肥后第3 d,各处理的氨挥发速率均达到最大值,不施氮肥(N0)、习惯施肥(N300/2)、氮肥减量(N210/2)和氮肥减量后移(N210/3)处理的峰值分别为N 0.21、1.43、1.10和0.76 kg/(hm^2·d),此后迅速降低,14 d后不同处理的氨挥发速率已无明显差异。与基施氮肥比较,拔节肥土壤氨挥发速率其峰值均有所增加,N0、N300/2、N210/2和N210/3处理其值分别增加了16.7%、26.5%、69.2%和85.4%。

孕穗期只是在氮肥减量后移处理追施尿素,在14 d内气温较高,最高、最低平均气温分别为27.5℃和12.4℃,13 d内降水量极少(图3),N210/3处理土壤氨挥发速率在施肥灌水后第3 d出现峰值,为N 0.96 kg/(hm^2·d),其峰值显著高于其他三个处理,此后迅速降低,14 d后与不施肥处理(N0)无明显差异。不施氮肥、习惯施肥和氮肥减量处理土壤氨挥发速率的变动幅度不大,但也均在第3 d出现峰值,其值分别为N 0.25(N0)、0.29(N300/2)和0.27(N210/2) kg/(hm^2·d),差异未达显著水平($P<0.05$)。

2.2 冬小麦季土壤累积氨挥发量

冬小麦不同施肥处理,随施肥量的减少,土壤累积氨挥发量呈减少趋势(图4)。施用基肥后,不施氮肥、习惯施肥、氮肥减量和氮肥减量后移处理的累

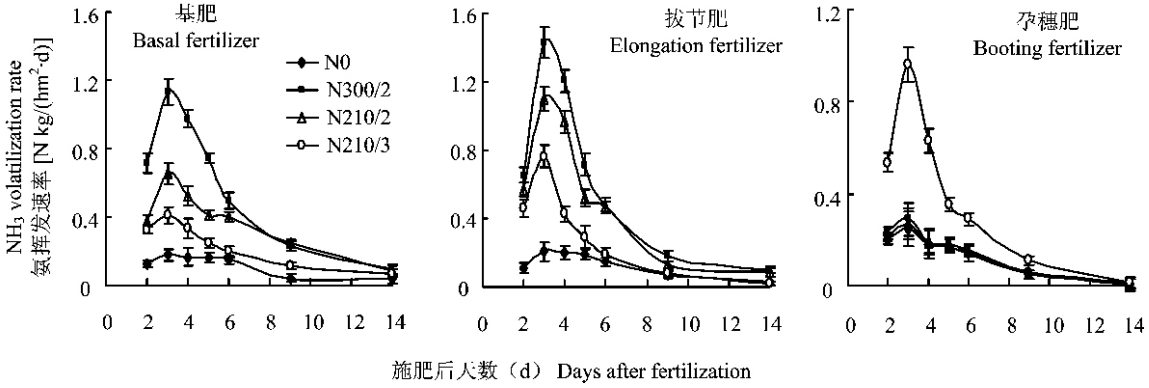

图 2　冬小麦季土壤的氨挥发速率

Fig.2　Ammonia volatilization rate in soil during winter wheat growing season

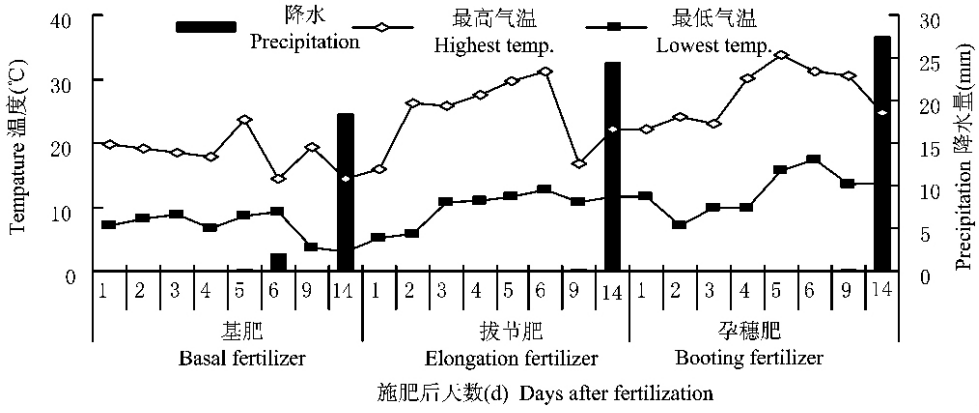

图 3　冬小麦试验期间的气温和降水量

Fig.3　Air temperature and rainfall during the winter wheat experiment period

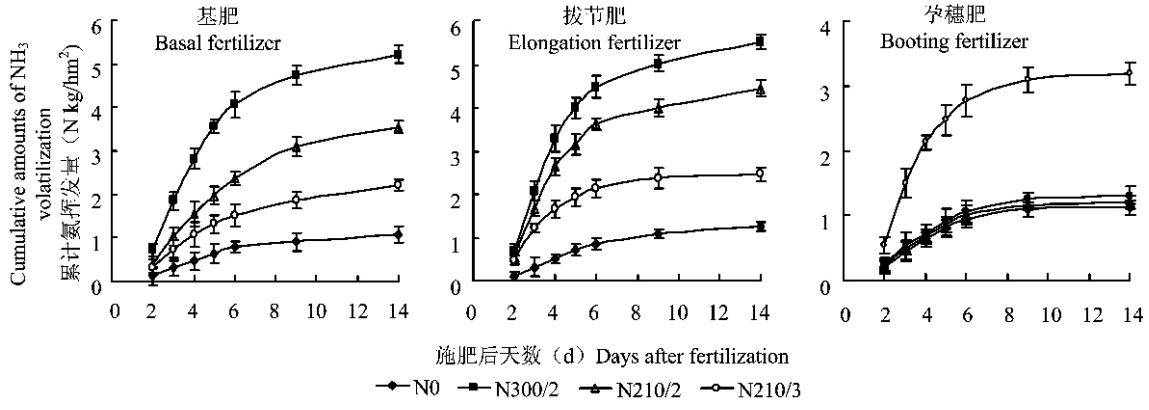

图 4　冬小麦季土壤的氨挥发量

Fig.4　Cumulative amounts of ammonia volatilization in soil during winter wheat growing season

积氨挥发量分别为 N 1.08、5.22、3.55 和 2.22 kg/hm^2。拔节期追施氮肥后分别为 N 1.25、5.54、4.45 和 2.46 kg/hm^2。孕穗期追施氮肥后分别为 N 1.12、1.31、1.21 和 3.18 kg/hm^2。三次施肥后测定显示,三个施肥时期累积氨挥发总量氮肥减量后移处理远低于习惯施肥。

2.3　夏玉米季土壤氨挥发速率

夏玉米季氮肥基施后,14 d 内最高、最低平均气温分别为 30.9℃和 20.5℃,总降水量为 41.4 mm,其中第 4 d 降水量为 40.5 mm(图 5)。土壤氨挥发速率

在施肥后第 2 d 和第 5 d 出现了两个峰值，习惯施肥、氮肥减量和氮肥减量后移处理的氨挥发速率峰值分别为 N 2.59 和 1.63 kg/(hm²·d)，N 1.37 和 1.23 kg/(hm²·d)，以及 N 0.89 和 0.74 kg/(hm²·d)，此后迅速降低。14 d 后，各小区的氨挥发速率已无明显差异，介于 N 0.04～0.10 kg/(hm²·d)之间(图 6)。

大喇叭口期追肥，14 d 内最高，最低平均气温分别为 32.3℃和 22.6℃，总降水量为 26.0 mm，其中第 1 d、第 4 d 降水量分别为 13.9 mm 和 10.8mm(图 5)。土壤氨挥发速率在施肥后第 2 d 和第 5 d 各施肥处理均出现了两个峰值，其峰值 N 240/2 处理分别为 N 2.93 和 2.40 kg/(hm²·d)，N 168/2 处理为 N 2.07 和 1.69 kg/(hm²·d)，N 168/3 处理为 N 1.94 和 1.15 kg/(hm²·d)，此后迅速降低，14 d 后不同处理小区的氨挥发速率已无明显差异(图 6)。与基施氮肥相比，相同处理的土壤氨挥发速率其峰值均有所增加，其增加幅度为 13.2%～118.0%。

吐丝期只是在氮肥减量后移处理追肥，气温有所回落，降水较少，14 d 内最高、最低平均气温分别为 28.1℃ 和 18.8℃，降水量为 1.4 mm(图 5)。N210/3处理土壤氨挥发速率在施肥灌水后第 2 d 出现峰值，峰值为 N 1.11 kg/(hm²·d)，其峰值显著高于其他处理，此后迅速降低，14 d 后与不施肥处理无明显差异(图 6)。不施氮肥、习惯施肥和氮肥减量处理土壤氨挥发速率的变动幅度不大，但也均在第 2 d 出现峰值，其值分别为 N 0.19 (N0)、0.21 (N240/2)和 0.20(N168/2) kg/(hm²·d)，差异未达显著水平($P < 0.05$)。

2.4 夏玉米季土壤累积氨挥发量

基施氮肥后，不施氮肥、习惯施肥、氮肥减量和氮肥减量后移处理的累积氨挥发量分别为 N 1.41、10.67、6.64 和 4.05 kg/hm²(图 7)。在这一时期，气温相对较高，降水量大，提高了土壤的氨挥发速率，增加了土壤的累积氨挥发量。大喇叭口期追施氮肥

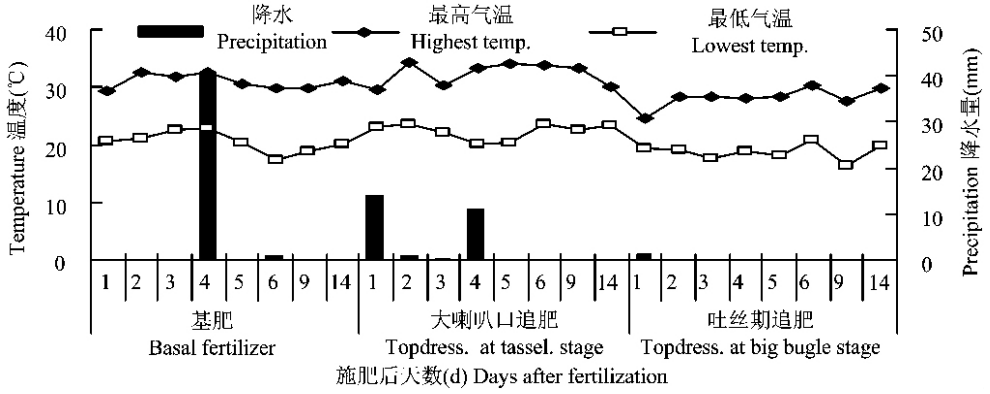

图 5 夏玉米试验期间的气温和降水量

Fig.5 Air temperature and rainfall during the summer corn experiment period

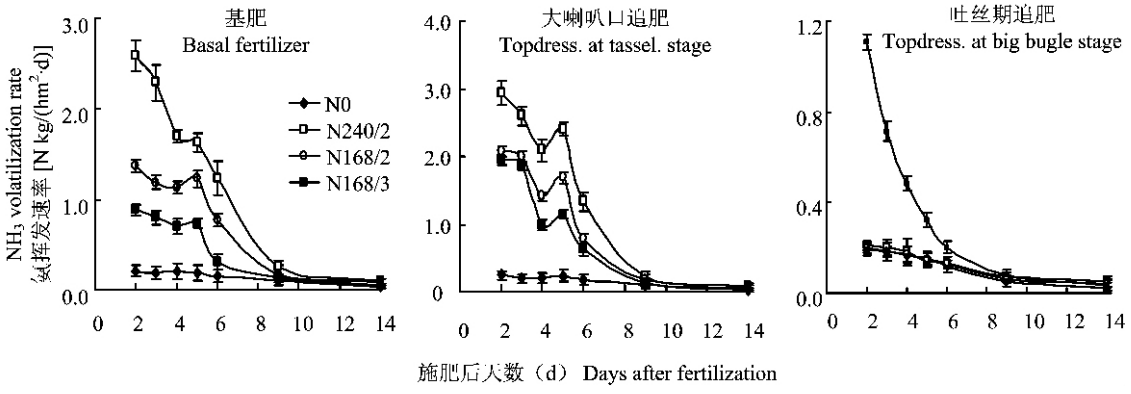

图 6 夏玉米季土壤的氨挥发速率

Fig.6 Ammonia volatilization rate in soil during summer corn growing season

后，累积氨挥发量各处理分别为 N 1.52、12.46、8.89 和 7.27 kg/hm²。与基施氮肥相比，各处理的土壤累积氨挥发量大喇叭口期追肥后均有所增加。导致这一结果的原因可能是气温升高，促进了氨挥发。孕穗期只是在氮肥减量后移处理追肥，土壤累积氨挥发量各处理分别为 N 1.08、1.34、1.22 和 3.24 kg/hm²，氮肥减量后移处理的累积氨挥发量显著高于其它三个处理。可见，三个施肥时期累积氨挥发总量氮肥减量后移处理远低于习惯施肥。

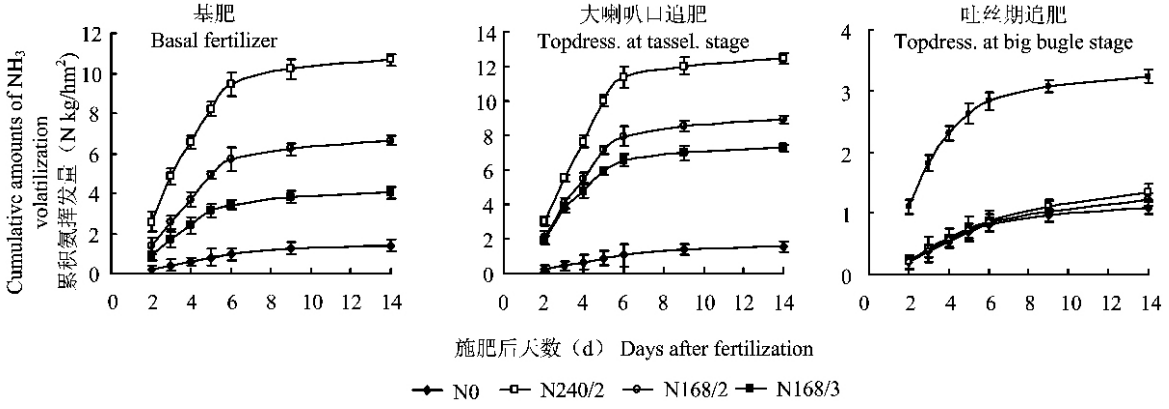

图 7　夏玉米季土壤累积氨挥发量

Fig.7　Cumulative amounts of ammonia volatilization in soil during summer corn growing season

2.5　产量和氮肥氨挥发损失率

与不施氮肥处理相比，小麦季习惯施肥、氮肥减量和氮肥减量后移处理，其产量分别增加了 8.76%、7.04% 和 9.84%，玉米季分别增加了 12.36%、11.01% 和 13.48%（表 1）。可见，与习惯施氮量相比，氮肥减量后移处理产量不仅没有降低，反而有所增加。

土壤中的氨挥发主要有两个来源，一个是土壤中原来残留的氮素，另一个是施入的氮肥。由于不考虑氮肥的激发效应，施肥小区来自土壤残留氮素的氨挥发等于不施氮小区的挥发量，施氮小区来自肥料的氨挥发可由其与不施肥小区的差值估算。基于试验期间每 15 d 测定土壤的氨挥发速率，以及施肥后的加密测定，整个小麦季和玉米季肥料氮的氨挥发损失总量及其损失率均表现出随施肥量的降低而降低，氮肥减量和氮肥减量后移处理的氨挥发总量显著低于习惯施肥。习惯施肥、氮肥减量和氮肥减量后移处理整个小麦季肥料氮的氨挥发总量分别

表 1　冬小麦/夏玉米产量及肥料氮的损失率

Tables 1　Grain yield and loss rate of fertilization N in wheat-corn rotation system

作物 Crops	处理 Treatments	子粒产量 Yield (kg/hm²)	增产 Increasing yield (%)	全生育期 Whole growth stage	
				氨挥发量（N kg/hm²） Cumulative amounts of NH_3 volatilization	肥料氮的氨挥发损失率（%） Loss rate of NH_3 volatilization from fertilization nitrogen
小麦 Wheat（衡观 35 HG35）	N0	5853 c		8.01 d	
	N300/2	6366 ab	8.76	24.92 a	5.64
	N210/2	6265 b	7.04	18.69 b	4.94
	N210/3	6429 a	9.84	15.43 c	3.39
玉米 Corn（郑单 958 ZD958）	N0	7539 c		5.26 d	
	N240/2	8471 ab	12.36	27.80 a	9.39
	N168/2	8369 b	11.01	19.46 b	8.45
	N168/3	8556 a	13.48	16.36 c	6.61

注（Note）：同种作物同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。Values followed by different letters in the same columm are significant at 5% level among different treatments of the same crop.

为 N 16.91、10.68 和 7.42 kg/hm^2，其损失率分别为 5.64%、4.94% 和 3.39%；整个玉米季肥料氮的氨挥发损失总量分别为 N 22.54、14.20 和 11.10 kg/hm^2，其损失率分别为 9.39%、8.45% 和 6.61%。小麦季和玉米季肥料氮的氨挥发总量习惯施肥处理是氮肥减量后移处理的 2.28 和 2.03 倍。从作物产量、氨挥发总量和肥料氮损失率分析，氮肥减量后移可节省氮肥 30%（表 1）。

3 讨论

环境因素温度和水分显著影响田间土壤的氨挥发。温度升高会使脲酶活性提高，减少土壤胶体对铵（NH_4^+）的吸附，加速铵向氨（NH_3）的转化，增加土壤溶液中的氨分压，促进氨由土壤表面向大气的挥发[19]。降雨使土壤湿度增大，促进了尿素水解，NH_4^+ 浓度升高，加速了铵态氮向氨气的转化，进而促进了氨挥发损失[20-22]。华北小麦/玉米轮作体系表施尿素其氨挥发损失量可以达到氮肥施用量的 45%～73%，施肥后土壤氨挥发的损失量（N）在 18.9～63.5 kg/hm^2 之间，占施氮量的 9.9%～37.0%，施肥结合灌水时损失量可以降低至 2%～8%[10]。本试验中综合不同施肥时期的观测结果发现，温度和土壤水分是影响氨挥发的主要因素。小麦季施基肥、拔节肥和孕穗肥的气温较低，降雨量少，氨挥发速率出现一个峰。玉米季基施尿素、大喇叭口期追施尿素，在 14 d 内气温较高，有大量降水，降水后导致氨挥发速率再次升高，氨挥发速率共出现两个峰，降雨量 > 10.8 mm 时，出现第二个峰，其后一个峰低于前一个峰，与李鑫等人[18]的研究结果一致。吐丝期追施尿素气温有所回落，降雨量较少，氨挥发速率出现一个峰。本试验中，施肥后结合灌水，小麦季肥料氮的氨挥发损失总量在 N 7.42～16.91 kg/hm^2 之间，其损失率为 3.39%～5.64%；玉米季肥料氮的氨挥发损失总量在 N 11.10～22.54 kg/hm^2 之间，其损失率为 6.61%～9.39%。

施氮量和施用时期显著影响氨挥发。董文旭等对不同施 N 水平下氨挥发损失的研究表明，不同施肥时期氨挥发差异明显，随施肥量的增加各施肥期氨挥发量增加[5]。王东等发现，低施氮量处理土壤氨挥发速率峰值低，高值持续时间短；增加施氮量，土壤氨挥发速率升高，峰值显著增加，高值持续时间延长，累计氨挥发量显著增大。在 0～168 kg/hm^2 施氮范围内，土壤氨挥发损失不超过基施氮肥投入量的 10%，过多施氮则土壤氨挥发损失显著升高[6]。本试验中，与习惯施肥处理相比，优化施肥的氮肥减施后移处理累积氨挥发量显著降低。优化施肥处理下，氮肥减量和氮肥减量后移对氨挥发和产量的影响也存在一定差异。尿素分 2 次施用的氨挥发量较大，尿素分 3 次施用的氨挥发量较低。其主要原因是，尿素 2 次施用造成土壤 NH_4^+ 浓度过高，氨挥发速率增加，而尿素 3 次施用不仅降低了土壤 NH_4^+ 浓度和氨挥发，而且提高了小麦产量和促进了氮素吸收。本研究中习惯施肥小麦季和玉米季氨挥发总量是氮肥减量后移的 2.28 和 2.03 倍，可见，通过氮肥后移，可节省氮肥 30%，是降低氨挥发损失的理想施肥方式。

参考文献：

[1] 陈新平，张福锁. 小麦－玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京：中国农业大学出版社，2006.
Chen X P, Zhang F S. Theory and practice of nutrient resource management in wheat-maize rotation system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.

[2] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境，2000，9(1)：1-6.
Zhu Z L. Loss of fertilization N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(1): 1-6.

[3] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Estimation of global NH_3 volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands[J]. Glob. Biogeochem. Cycl., 2002, 16(2): 1024-1039.

[4] Fan X H, Song Y S H, Lin D X *et al*. Ammonia volatilization loss and ^{15}N balance from urea applied to rice on paddy soil[J]. J. Environ. Sci., 2006, 18(2): 299-303.

[5] 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-Agri., 2006, 16(3): 46-48.

[6] 王东，于振文，于文明，等. 施氮水平对高产麦田土壤硝态氮时空变化及氨挥发的影响[J]. 应用生态报，2006，17(9)：1593-1598.
Wang D, Yu Z W, Yu W M *et al*. Effects of nitrogen application level on soil nitrate accumulation and ammonia volatilization in high-yielding wheat field[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(9): 1593-1598.

[7] 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[J]. 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[J]. Acta Agric. Boreali-Sin., 2001, 16(2): 83-86.

[8] 苏芳，丁新泉，高志岭，等. 华北平原冬小麦－夏玉米轮作体系

氮肥的氨挥发[J]. 中国环境科学,2007,27(3):409-413.
Su F, Ding X Q, Gao Z L *et al*. Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain[J]. China Environ. Sci., 2007, 27(3):409-413.

[9] 朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科技出版社,1992. 171-185.
Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China[M]. Beijing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 171-185.

[10] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学,2002,35(12):1493-1499.
Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al*. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(12):1493-1499.

[11] 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.

[12] Li H, Liang X, Chen Y *et al*. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management[J]. Agric. Water Manag., 2007, 2461:1-8.

[13] Denmead O T. Chamber systems for measuring nitrous oxide emissions from soils in the field[J]. Soil Sci Soc Am J, 1977, 43:89.

[14] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等. 田间土壤氨挥发的原位测定-通气法[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209.
Wang Z H, Liu X J, Ju X T *et al*. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(2):205-209.

[15] Misselbrook T H, Nicholson F A, Chambers B J *et al*. Measuring ammonia emissions from land applied manure: an intercomparison of commonly used samplers and technique[J]. Environ. Poll., 2005, 135:389-397.

[16] Monteith J L, Usworth M H. Principles of environmental physics[M]. London: Edward Arnold, 1990.

[17] Pacholski A. Calibration of a simple method for determining ammonia volatilization in the field[J]. Landbau-forschung, Volkenrode: Sonderheft, 2003, 249.

[18] 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.

[19] Freney J R, Simpson J R, Denead O T. Ammonia volatilization[A]. Freney J R, Simpson J R (eds). Gaseous loss of nitrogen from plant-soil systems[M]. The Hague: Martinus N ijhoff/Dr. W Junk Publishers, 1983. 1-32.

[20] 纪锐琳,朱义年,佟小薇,等. 竹炭包膜尿素在土壤中的氨挥发损失及其影响因素[J]. 桂林工学院学报,2008,28(1):113-118.
Ji R L, Zhu Y N, Tong X W *et al*. Ammonia volatilization of bamboo. Charcoal coated urea in soil and affecting factors[J]. J. Guilin Univ. Techn., 2008, 28(1):113-118.

[21] Cabrera M L, Kissel D E, Rema J A *et al*. Ammonia volatilization from urea-based fertilizers applied to tall fescue pastures in Georgia, USA[J]. Soil Sci. Soc. 2008, 72:1665-1671.

[22] 贺发云,尹斌,金雪霞,等. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究[J]. 土壤学报,2005,42(2):253-259.
He F Y, Yin B, Jin X X *et al*. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in Nanjing suburbs[J]. Acta Pedol. Sin., 2005, 42(2):253-259.