

新疆灰漠土区不同肥料配比土壤氨挥发原位监测

徐万里^{1,2}, 刘 骅¹, 张云舒¹, 王西和¹, 秦 巧¹, 廖宗文^{2,*}

(1. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091; 2. 华南农业大学资源与环境学院, 广州 510642)

摘要:在 17a 的新疆国家灰漠土土壤肥力与肥料效益长期定位试验区, 采用通气法对春小麦种植体系 8 种处理, 即(1)对照(种植、不施肥, CK)、(2)施氮肥(N)、(3)施氮磷肥(NP)、(4)施氮钾肥(NK)、(5)施氮磷钾肥(NPK)、(6)施氮磷钾肥 + 有机肥增量(NPKM1)、(7)施氮磷钾肥 + 有机肥常量(NPKM2)、(8)施氮磷钾肥 + 秸秆还田(NPKS)的氨挥发损失与不同肥料配比、长期不同施肥土壤特性变化之间关系进行研究。结果表明:(1)在当地春小麦种植典型施肥模式, 即“基肥撒施后机械翻耕, 追肥撒施后灌水”下, 在施氮量为 $84.97 \sim 241.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的条件下, 不同处理基肥氨挥发累积量为 $0.194 \sim 2.236 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间; 追肥氨挥发累积量在 $0.078 \sim 0.210 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 远低于基肥氨挥发量; 基肥和追肥氨挥发损失氮素之和占总施氮量的 $0.39\% \sim 1.23\%$ 。(2)相同施氮量 $241.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 N、NP、NK、NPK 4 个处理, 氨挥发累积量分别为 1.017、0.944、1.988、2.437 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氨挥发量与不同处理土壤速效钾含量相关性达显著水平($r=0.951, P<0.05, n=4$)。(3)施氮量分别为 151.8、84.9、216.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机肥处理 NPKM1、NPKM2、NPKS 的氨挥发累积量分别为 1.404、1.041、1.583 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氨挥发量与氮肥使用量呈显著正相关($r=0.581, P<0.05, n=18$)。以上结果表明, 氨挥发不是新疆灰漠土长期定位试验春小麦体系氮肥损失的主要途径; 不同肥料配比和长期不同肥料配比造成土壤特性的变化是 7 种施氮肥处理氨挥发差异的主要原因。

关键词:氨挥发; 长期定位试验; 氮肥利用率; 原位监测

文章编号: 1000-0933(2009)08-4565-07 中图分类号: X171 文献标识码: A

In Situ monitoring of ammonia volatilization from grey desert soil under different in Xinjiang

XU Wan-Li^{1,2}, LIU-Hua¹, ZHANG Yun-Shu¹, WANG Xi-He¹, QIN Qiao¹, LIAO Zong-Wen^{2,*}

1 Institute of Soil and Fertilizer & Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agriculture Sciences, Urumqi Xinjiang 830091, China

2 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4565 ~ 4571.

Abstract: Ammonia volatilization loss of nitrogenous fertilizers in Grey Desert soil Field of Xinjiang were monitored *in situ* by the method of phosphoric acid and glycerol-sponge venting chamber. Ammonia volatilization loss Characteristics were measured under different fertilization-cropping systems in the oasis of Xingjiang. The fertilizer treatments were CK (without fertilizer), N alone, N + P, N + P + K, N + P + K + M1 (M1- manure at increased application rate), N + P + K + M2 (manure at normal application rate), and N + P + K + S (S-plant residue returned to field). The obtained results are summarized as follows: (1) In the long-term spring wheat cropping system, with a typical fertilization mode of “field ploughed deeply after basal fertilizer application and irrigation conducted immediately after topdressing application”, ammonia volatilization loss was $0.27 \sim 2.48 \text{ kg hm}^{-2}$ with the N fertilizer application rates of $84.97 \sim 241.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the loss represented $0.39\% \sim 1.23\%$ of the total applied fertilizer N, The ammonia volatilization loss from basal fertilizers was higher than that from topdressing. (2) At the same N rate, the accumulated N loss by ammonia volatilization was 1.02, 0.94, 1.99, and 2.44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively for N, N + P, N + K, and N + P + K treatment and significantly correlated with available K in the soils ($r=0.951, P<0.05, n=4$). (3) the accumulated volatilization N loss was 1.40, 1.04,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40361005); 国家科技基础条件平台建设资助项目(SF2007-2)

收稿日期: 2008-08-04; 修订日期: 2009-04-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zwliao@sohu.com

and $1.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively for the N + P + K + M1, N + P + K + M2, and N + P + K + S treatment and significantly correlated with N fertilizer rate ($r=0.581$, $P<0.05$, $n=18$). These results indicate that ammonia volatilization loss from N fertilizers was not the major pathway of N losses under the current dominant cropping system (spring wheat). The differences in volatilization N loss in the green belt of Xinjiang are mainly caused by various combinations of organic and inorganic fertilizers, which change soil properties in the long run.

Key Words: ammonia volatilization; long-term field experiment; nitrogen use efficiency; *in situ* monitoring

氨挥发是氮肥损失的重要途径,其对农业生产经济效益、生态环境造成的损失和危害已被人们所认识。不同农业生态区域耕作模式、土壤特性、施肥方法、施肥配比与施肥量、气温、水分等因素的差异对氨挥发都有不同程度的影响^[1,2]。研究不同农业生态区氨挥发损失特征,可为制定相应氮肥管理措施、提高氮肥利用率提供依据,同时也为评估区域氨挥发生态效应提供基本数据。对于我国北方旱作体系氨挥发研究,目前国内报道较多的是华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系。研究结果显示,该体系氮肥氨挥发损失率为 $0.6\% \sim 35.9\%$ ^[3~6]。新疆地处内陆干旱地区,土壤 pH 值多在 8.0 以上,碳酸钙含量为 $8.0\% \sim 23\%$,属典型的石灰性土壤;降雨量为 $150 \sim 350 \text{ mm}$,农业属于灌溉农业,人均耕地面积大,大田操作机械化程度高。近年研究表明,新疆绿洲农田氮肥利用率为 $28.2\% \sim 53.5\%$ ^[7~9]。毛端明等用 N^{15} 示踪法在田间微区种植条件下研究表明,在新疆 3 种土壤上,气态损失达 $26.8\% \sim 70.0\%$,平均 47.1% ^[7]。但此结果为田间微区差减法所得,不能肯定其为大田生产情况下氨损失量。目前对该区域农田氮肥去向和损失途径报道较少。灰漠土是典型的干旱荒漠地带性土壤,主要分布在新疆天山北坡山前平原洪积冲积扇的中下部,面积 50 万 hm^2 ,是新疆北部主要农业土壤。但是灰漠土“白、板、干”的土壤特性限制该区域农业生产发展。大量定位试验研究结果表明,长期不同肥料配比,特别是配施有机肥,能明显改善土壤理化性质^[10,11]。本文采用磷酸甘油-双层海绵通气法(以下简称通气法)^[12],对新疆国家灰漠土土壤肥力与肥料效益长期定位试验春小麦种植体系氮肥氨挥发进行田间原位监测,探讨不同肥料配比以及长期不同肥料配比下土壤特性改变对氮肥氨挥发影响,为探明干旱区绿洲农田氮肥损失途径,提高氮肥利用率,评估新疆区域氨挥发数量提供基本数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于新疆乌鲁木齐市以北 22 km 新疆农业科学院安宁渠综合试验场($\text{N}:43^\circ 95' 26''$, $\text{E}:87^\circ 46' 45''$),海拔 600 m ,属干旱半干旱荒漠气候带,近 3a 年均降水量 310 mm ,主要集中在 5~8 月份;年均蒸发量 2570 mm ,年均气温 7.7°C ,年均日照时数 2594 h ,无霜期 156 d 。土壤母质为第四纪黄土状沉积物,属灰漠土土类中度熟化灰漠土,在北疆农耕地具有典型性和代表性。

试验设 9 个处理,每个小区面积 468 m^2 ($15.5 \text{ m} \times 30.2 \text{ m}$),顺序区组排列,不设重复。试验 1990 年开始,种植制度为春玉米→春小麦(或冬小麦)。9 处理分别为(1)对照(种植、不施肥,CK)、(2)施氮肥(N)、(3)施氮磷肥(NP)、(4)施氮钾肥(NK)、(5)施磷钾肥(PK)、(6)施氮磷钾肥(NPK)、(7)施氮磷钾肥+有机肥增量(NPKM1)、(8)施氮磷钾化肥+有机肥常量(NPKM2)、(9)施氮磷钾化肥+秸秆还田(NPKS)。具体施肥量见表 1。其中,氮肥为尿素($\text{N}\%$, 46%),磷肥为重过磷酸钙(P_2O_5 , 44%),钾肥为硫酸钾(K_2O , 50%)。有机肥为羊粪,每年秋季一次施入翻地,秸秆还田是当季作物收获后全部秸秆粉碎翻地。试验进行前不同施肥小区土壤主要理化性质见表 2。

1.2 田间试验

2006 年 3 月至 7 月春小麦种植期间,选择 CK、N、NP、NK、NPK、NPKM1、NPKM2、NPKS 等 8 种处理,对基肥和追肥氮肥氨挥发特征进行原位监测。3 月 25 日,将 60% 氮肥、全部磷钾肥均匀撒施地表,机械深翻、耙耱后播种。5 月 19 日,在春小麦拔节期追入剩余 40% 的氮肥,撒施后灌水。试验地采用管道灌溉,各小区统一

灌水量。分别于4月20日,5月19日,6月10日,7月3日灌水,灌水量为 $900 \sim 1050 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,整个生育期灌水 $3600 \sim 4200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 1 长期定位试验设计 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 The design of long-term located experiment

处理 Treatments	羊粪 Sheep manure	秸秆还田 Returning straw	N	P_2O_5	K_2O
CK	0	否 no	0	0	0
N	0	否	241.5	0	0
NP	0	否	241.5	138	0
NK	0	否	241.5	0	56.25
PK	0	否	0	138	56.25
NPK	0	否	241.5	138	56.25
NPKM1	45000	否	151.8	90.39	17.25
NPKM2	30000	否	84.9	51.41	11.25
NPKS	0	是 yes	216.7	116.61	47.25

表 2 2006 年试验前不同处理耕层(0~20cm)土壤理化特性

Table 2 Chemical properties of soils before experiment in 2006

处理代号 Treatments	pH (H_2O 1:1)	Ec (H_2O 1:5) ($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)	有机质 O. M. ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 Total N ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available N ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
CK	8.24a	0.25d	14.45c	0.79cd	0.80d	53.90e	3.64de	100.09d	1.7c
N	7.9e	0.35b	15.21c	0.88cd	1.00cd	58.45d	2.32e	116.63d	1.74bc
NP	8.09bc	0.24d	16.42c	0.88cd	1.11bcd	69.84c	11.1cd	92.99e	1.94a
NK	8.08bc	0.25d	14.89c	0.85cd	1.02cd	60.73d	3.42de	155.05c	1.82b
NPK	8.06c	0.27c	14.23c	0.97c	1.39ab	60.73d	13.51c	160.96c	1.50d
NPKM1	8.12b	0.38a	34.57a	1.75a	1.69a	131.33a	76.01a	329.39a	1.65c
NPKM2	8.08bc	0.27c	21.67b	1.47b	1.28bc	109.32b	32.13b	258.47b	1.48d
NPKS	7.97d	0.27c	13.47c	0.71d	1.08cd	66.81c	11.1cde	122.54d	1.74bc

(1) 容重为 2002 年收获后数据 Bulk density analyzed from 2002; (2) 数值后不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著性 ($P < 0.05$)

Small letters indicated significant differences between fertilization treatments at $P < 0.05$ respectively

1.3 氨挥发田间原位监测

氨挥发测定采用通气法^[12]。用内径 15cm,高 20cm PVC 管子制成。测定时将浸有 15ml 磷酸甘油溶液 (50ml 磷酸 + 40ml 丙三醇,定容至 1L)两块海绵(厚 2cm、直径 16cm)置于 PVC 管中,下层海绵距管底 8cm,上层海绵与管顶部相平或略低。

氨挥发测定于施肥后当天开始,在各小区不同位置放置 6 个氨捕获装置,次日 10:00 取样。取样时,取出下层海绵,迅速按处理编号装入封口袋中,密封;同时换上另一块浸过磷酸甘油溶液的海绵。上层海绵视其干湿情况每天或隔天喷洒磷酸甘油 1 次。取样后变动捕获装置摆放位置,开始下一次田间吸收。

取下的海绵带回试验室后,将 300ml 浓度为 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液分 4~6 次加入封口袋中反复挤压得到浸提液,用靛酚蓝比色法测定浸提液中的铵态氮。施肥后第 1 周,每天取样 1 次;第 2~3 周,视测到挥发氨数量多少,每 2~3d 取样 1 次,直至不同处理氨挥发与对照一致为止。本次试验基肥氨挥发监测了 23d,追肥监测了 9d。

1.4 数据计算和统计

由下式计算田间土壤的氨挥发速率^[6]: $\text{NH}_3\text{-N} [\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{d})^{-1}] = [M \cdot (A \times D)^{-1}] \times 10^{-2}$ 。其中, M 为通气法单个装置平均每次测得的氨量 ($\text{NH}_3\text{-N}$, mg); A 为捕获装置的横截面积 (m^2); D 为每次连续捕获的时间 (d)。

数据分析统计通过 DPS v10.15 软件进行^[23]。

2 结果与分析

2.1 不同施肥制度下基肥氨挥发损失特征

从图 1 可看出,不同处理氨挥发变化趋势一致,开始就出现氨挥发速率的高峰,随着时间的推进,在 3 月 30 日和 4 月 2 日试验地分别降雨 5.8 mm 和 3.6 mm,气温有明显的下降,氨挥发量分别出现了低谷,随后出现高峰或次高峰,然后衰减到微量。

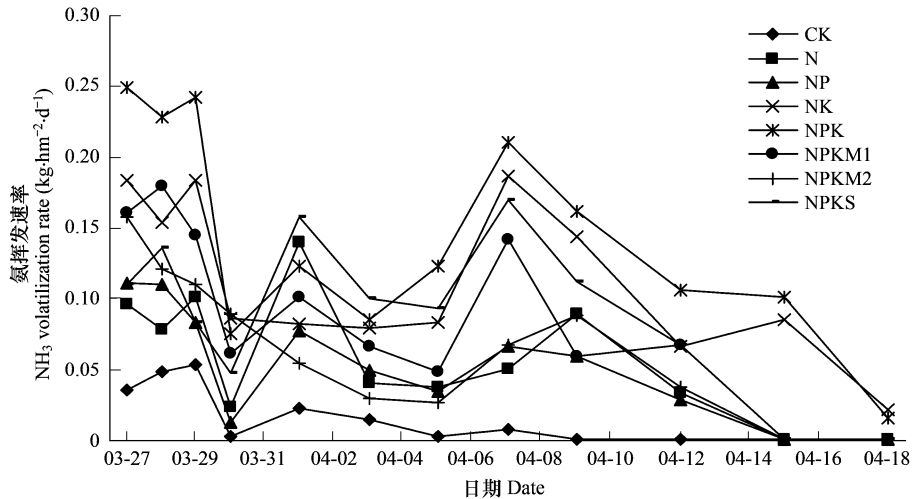


图 1 基肥氨挥发速率动态变化

Fig. 1 Patterns of NH_3 volatilization rate after basal application

从图 1 和图 2 均可看出,灰漠土长期定位试验各处理氮肥基肥氨挥发特征明显不同。施氮量同为 $144.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 N、NP、NK、NPK 等 4 个化肥处理,其氨挥发量的大小顺序为 $\text{NPK} > \text{NK} > \text{N} > \text{NP}$,方差分析显示,除 NP、N 之间差异未达到显著水平外,其余处理之间差异均达显著水平(图 2);氨挥发量与土壤速效钾含量达到显著相关水平($r=0.9534, P<0.05, n=4$)。在这 4 个处理中,长期不同施肥配比对土壤性质改变是氨挥发差异的主要原因。施氮量分别为 91.08 、 50.94 、 $130.02 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 3 个有机肥处理 NPKM1、NPKM2、NPKS 氨挥发量与基肥氮肥施入量成正相关,且达到差异极显著水平($r=0.5935, P<0.01, n=18$),说明在相同施肥条件下,氨挥发随施肥量的增加而上升。在这 3 个处理中,虽然长期不同施肥对土壤性质造成差异,一些指标也达到差异显著水平,但与施氮量差异相比还是小,氨挥发差异主要与施氮量大小相关。

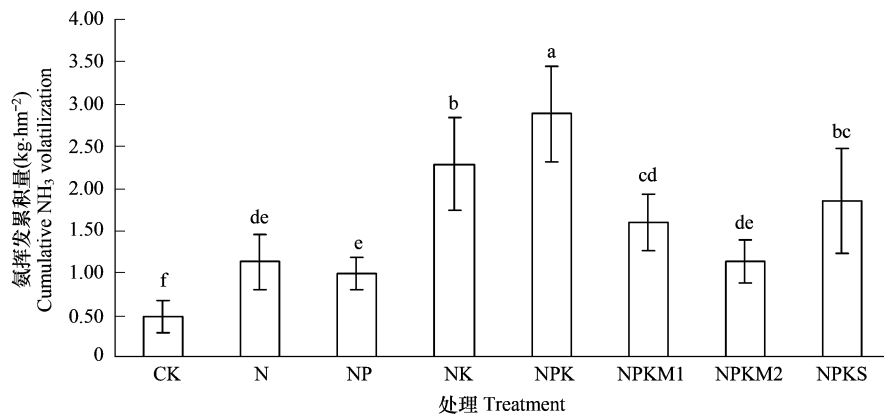


图 2 基肥氨挥发累积量

Fig. 2 Cumulative Ammonia volatilization after basal application of urea

在监测的 23d 内,CK、N、NP、NK、NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKS 等 8 个处理土壤的氮挥发平均速率在 $8.00 \sim 97 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间;累积挥发氮素量分别为 0.194、0.874、0.770、1.778、2.236、1.238、0.882、1.441 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。除 CK 处理外,其余 7 个处理氮挥发氮素分别占氮肥基施量的 0.60%、0.53%、1.23%、1.54%、1.36%、1.73%、1.11%。以上分析可知,基肥氮挥发损失比例低,当季肥料配比和长期不同施肥配比对土壤性质改变是不同处理氮挥发差异显著的主要原因。

2.2 不同施肥制度下追肥氮挥发损失特征

与基肥相比较,追肥氮挥发持续时间较短,仅为 5~7d。除 CK、N、NP、NK 处理是持续下降的过程外,NPK、NPKM1、NPKM2 和 NPKS 处理均为先上升后下降的过程。在本试验中,氮肥作为追肥氮挥发损失量较小,主要因为肥料撒施后马上灌水,且灌水量为 $1050 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,较大。灌水结束后立即放入吸收装置,由于土壤 pH 值较高,所以肥料溶解在水中后有快速挥发的过程;但是随后水分的下渗,溶解后的尿素或铵根离子随水下渗进入土壤深层;同时硝化作用的进行,铵离子浓度降低,氮挥发随之降低。

相同施氮量的 N、NP、NK、NPK 4 个处理,其氮挥发累积量为 $\text{NK} > \text{NPK} > \text{NP} > \text{N}$ (表 3)。在基肥中,氮挥发累积量 $\text{N} > \text{NP}$,而在追肥处理中为 $\text{NP} > \text{N}$ 。原因是施用基肥时,NP 处理是将尿素与全部重过磷酸钙混合后撒施,重过磷酸钙颗粒水解后使周边土壤微环境 pH 有所下降,导致混施的尿素氮挥发降低;而追肥时,仅追施尿素。尿素与酸性磷肥混施能降低氮损失已有报道^[4]。NPKM1、NPKM2、NPKS 3 个有机肥处理的氮挥发绝对量与追肥化肥 N 的施入量无关,与基肥结论不一致。

表 3 灰漠土长期定位试验追肥后氮挥发

Table 3 Ammonia volatilization from gray soil after top dressing of urea

处理 Treatment	施氮量 Fertilization rate ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	最大速率 Maximum flux ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	最大速率出现天数 Maximum flux time (d)	累积量 Amount of loss ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	损失率 Loss rate (%)
CK	0	33	1	0.078	—
N	96.6	68	1	0.143	0.15
NP	96.6	73	1	0.174	0.18
NK	96.6	65	1	0.210	0.22
NPK	96.6	84	3	0.201	0.21
NPKM1	60.7	59	2	0.166	0.27
NPKM2	33.9	44	3	0.159	0.47
NPKS	86.7	47	2	0.142	0.16

3 讨论

降雨与灌溉导致土壤水分变化是影响氮挥发的重要因素。基肥监测中两次微量降雨导致氮挥发先降低后升高的现象,主要是新疆气候干燥,施肥后土壤迅速干燥可能使部分尿素颗粒不能水解,少量降雨土壤水分增加促进尿素水解,增加土壤浅表层(0~5cm,下同)铵根离子浓度,随之土壤水分降低氮挥发增加。贺发云^[13]、曹兵^[14]等人的研究也有类似现象。与基肥相比较,追肥氮挥发低,主要由于施基肥时适墒播种,有利于浅表层尿素水解挥发;追肥后灌溉,溶解后的尿素或铵根离子随水下渗进入土壤深层,氮挥发低。王朝晖^[6]、贺发云等^[13]报道,降雨量或灌溉量大,会大幅度降低甚至测不出氮挥发,本试验中追肥氮挥发即为类似情况。

目前旱作条件下田间氮肥氮挥发损失有不少报道^[3~6],但对于氮挥发是否为旱作种植体系氮肥损失的主要途径,看法却并不一致^[3~6,9,20]。传统观点认为,氮挥发损失是北方石灰性土壤上氮肥损失的主要途径^[16]。在本试验区域,灰漠土为典型的石灰性土壤,但是在本试验中氮挥发直接测定量却没有超过氮肥施入量的 2%,是否反映了该种植体系氮肥氮挥发损失的真实值呢?在本试验中用通气法监测同时,在 CK、N、NP、NPK、NPKM1、NPKS 等 6 处理设置密闭室间歇式强制抽气法^[13]来测定氮挥发,除 CK 外,氮挥发损失占施氮

量的 1.27% ~ 3.77%, 虽然结果比通气法结果略偏高, 但属较低范围, 证明试验结果是接近田间真实情况的。为进一步验证试验结果, 在 2006 年 9 月 8 日到 10 月 19 日, 以施氮量为 $240\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 水平, 在本文试验地旁微区 ($1\text{m}\times 2\text{m}$) 设置了表施、5、10、20cm 等 4 个不同施肥深度处理, 应用通气法, 按照与大田相同操作对氨挥发进行监测, 发现深施 10cm 和 20cm 的处理, 氨挥发特征与长期定位试验处理类似, 在施肥后 10 ~ 15d, 氨挥发基本结束; 表施和 5cm 浅施处理, 受降雨影响土壤水分, 氨挥发一直持续到施肥后 40d 左右。结果显示, 表施、5cm 浅施、10cm 深施、20cm 深施处理的氨挥发量分别占施入氮量的 22.02%, 13.42%, 1.69% 和 1.47%。这一验证试验说明即使在典型的石灰性土壤上, 施肥深度是决定氨挥发量大小的主要因素; 同时证实试验结果是可靠的。Cai G X 等人用微气象法在河北封丘石灰性土壤上研究表明, 氮肥深施, 氨挥发量在 0.6% 和 2.3%^[15], 与本试验结果类似。

本研究表明氮肥氨挥发损失仅占氮肥施入量的 0.39% ~ 1.23%, 与我国北方许多报道数据相比偏低^[3-6, 17, 18]。氨挥发大小, 除施肥后降雨或灌溉影响外, 主要与试验施肥操作有关。氮素是十分活跃的元素, 施肥操作影响氮肥埋深, 直接影响氨挥发量大小。上述报道多为田间小区试验, 如果小区面积较小, 人工布置试验过程中操作很可能将大量氮肥残留浅表层, 导致大量氨挥发损失; 而机械深翻会有相反结果。因此, 在采用田间原位试验进行区域农业体系氨挥发评估时, 除考虑测定方法的影响外, 要特别注意田间试验操作是否与当地具有代表性的施肥模式一致。只有这样才能真实科学评价区域种植体系氨挥发损失量。

新疆农业生产中, 施肥播种操作均为机械操作, 翻耕深度一般在 20 ~ 28cm 之间, 停留在土壤深层的尿素水解硝化后, 除被作物吸收外, 剩余部分在土壤中累积。春小麦从 3 月份播种到 7 月份收获, 由于降雨量小, 每 15 ~ 20d 浇 1 次水, 前期作物根系吸收养分有限, 而灌溉使硝态氮向深层迁移。灰漠土长期定位试验 0 ~ 300cm 剖面硝态氮的测试结果也说明了, 在该试验的轮作体系内, 氮肥有向深层迁移的趋势^[19]。巨晓棠^[20]、田长彦^[21]、吕殿青^[22]等人的研究结果也表明, 在北方旱作灌溉体系氮肥淋失损失可能是氮肥损失的主要途径之一。但从本地区基本气象资料可知, 试验区降水量年平均在 310mm, 加上灌水量约为 360 ~ 420 mm, 远低于年蒸发量 2570mm, 土壤水分总体向上。这种农田水分蒸发量远大于输入量的现象与氮肥硝态氮淋失损失之间的关系有待进一步研究。

References:

- [1] Zhang F S, Ju X T. Discussion on nitrogen management and environment in agroecosystems of sustained development of agriculture. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (supplement): 41 - 55.
- [2] Cai G X. Ammonia volatilization from the soil. In: Zhu Z L, Wen Q X eds. *Nitrogen in soil of China*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 171 - 196.
- [3] Li G T, Li B G, Cheng D L. Ammonia Volatilization from Large Field Planted with Winter Wheat and Summer Maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2002, 17(1): 76 - 81.
- [4] Dong W X, Hu C S, Zhang Y M. *In situ* determination of ammonia volatilization in field of North China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14 (3): 46 - 48.
- [5] Huang B X, Su F, Ding X Q, Hu X K, Gao Z L, Chen X P, Zhang F S, Kogge Martin, R mheld Volker. German Wind-Tunnel system for measuring ammonia volatilization from agricultural soil. *Soils*, 2006, 38 (6): 712 - 716.
- [6] Wang Z H, Liu X J, Ju X T, Zhang F S. *In situ* determination of ammonia volatilization from wheat-maize rotation system field in north china. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(3): 359 - 365.
- [7] Mao D M, Xiang M C, Ma E C, Ni K W, Zhang H W. Study on lost ways of urea nitrogen in xinjiang three main agricultural soils. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1993, 2(4): 34 - 38.
- [8] Zhao L, Hou Z A, Wei C Z, Ye J, Yi Z B, Guo S, Pao P Y, Zhang X K, Xiao L. Effect of nitrogen and phosphate fertilizer on cotton under-mulch-drip irrigation system. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 307 - 310.
- [9] Li J H, Ma F Y, ZHeng Z, Wei C Z, Liu M. Effect of nitrogen absorption, distribution and utilization efficiency with urea dripping on mulched-cotton by drip irrigation. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2005, 4: 40 - 43.
- [10] Zhao B Q, Zhang F D. Long-term fertilizer experiments in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(supplement): 3 - 8.
- [11] Xu M G, Liang G Q, Zhang F D. Evolution of soil fertilizer of China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006. 3 - 6.

- [12] Wang Z H, Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205—209.
- [13] He F Y, Yin B, Jin X X, Cao B, Cai G X. Ammonia volatilization from urea applied to two vegetable fields in nanjing suburbs. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2):253—259
- [14] Cao B, Li X H, Zhang L, Zou G Y, Gao X Z, Zhao C J. Effect of different basal-dressing application methods on soil ammonia volatilization from winter wheat field. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16(2):83—86.
- [15] Cai G, White R E, Chen D, Fan X H, Pacholski A, Zhu Z L, Ding H. Gaseous nitrogen losses from urea applied to maize on a calcareous fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, 40(5) 737—748,
- [16] Zhu Z L, Cai G X, J. R. Simpson, Zhang S L, Chen D L, Jackson A V, Freney J R. Simpson J R, *et al.* Process of nitrogen loss from fertilizers applied to flooded rice fields on a calcareous soil in north central China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1988 18(2): 101—115.
- [17] Su F, Ding X Q, Gao Z L, Huang B X, Chen X P, Zhang F S, Martin Kogge, Volker Romheld. Ammonia volatilization from nitrogen fertilization of winter wheat-summer maize rotation system in the North China Plain. *China Environmental Science*, 2007, 27(3):409—413
- [18] ZHANG Y M, HU C S, Dong W X. Ammonia volatilization from wheat maize rotation field in the piedmont of Taihang. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3):417—419
- [19] Liu H, Wang J L, Luo G H, *et al.* Effect of long term fertilization on C, N balance and accumulation of $\text{NO}_3\text{-N}$ in desert grey soil profile. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(supplement): 96—99.
- [20] Ju X T, Liu X J, Zou G Y, Wang Z H, Zhang F S. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system. *Scientia Agricultura Sinica*, 35(12):1493—1499
- [21] Tian C Y, Feng G. Cotton integrated nutrient resource management in xinjiang. Beijing: Science Press, 2008. 120—129.
- [22] Lu D Q, Ove Emteryd, Tong Y A, Zhang W X. Losing ways of nitrogen fertilizer in agriculture and environmental pollution. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(supplement):77—89.
- [23] Tang Q Y, Feng M G. DPS Data processing system; Experimental design, statistical analysis, and data mining. Beijing: Science Press, 2007.

参考文献:

- [1] 张福锁, 巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识. *土壤学报*, 2002, 39(增刊):45~55.
- [2] 蔡贵信. 土壤氨挥发. 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京:江苏科技出版社, 1992. 171~196.
- [3] 李贵桐, 李保国, 陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氨挥发. *华北农学报*, 2002, 17(1):76~81.
- [4] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3):46~48.
- [5] 黄彬香, 苏芳, 丁新泉, 胡小康, 高志岭, 陈新平, 张福锁, Kogge Martin, Romheld Volker. 田间土壤氨挥发的原位测定——风洞法. *土壤*, 2006, 38(6):712~716.
- [6] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氨挥发的原位测定. *生态学报*, 2002, 22(3):359~365.
- [7] 毛端明, 向敏超, 马郭超, 倪克文, 张惠文. 新疆三种主要农田土壤尿素氮的损失研究. *西北农业学报*, 1993, 2(4):34~38.
- [8] 赵玲, 候振安, 危常州, 冶军, 易正炳, 郭琛, 鲍柏杨, 张祥坤, 肖丽. 膜下滴灌棉花氮磷肥施用效果研究. *土壤通报*, 2004, 35(3):307~310.
- [9] 李俊华, 马富裕, 郑重, 危常州, 刘梅. 膜下滴施尿素对棉花氮素吸收、分配、利用效率的影响. *土壤肥料*, 2005, 4:40~43.
- [10] 赵秉强, 张夫道. 我国的长期肥料定位试验研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊):3~8
- [11] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变. 北京:中国农业科技出版社, 2006. 3~16.
- [12] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2):205~209.
- [13] 贺发云, 尹斌, 金雪霞, 曹兵, 蔡贵信. 南京两种菜地土壤氨挥发的研究. *土壤学报*, 2005, 42(2):253~259.
- [14] 曹兵, 李新慧, 张琳, 邹国元, 高祥照, 赵春江. 冬小麦不同基肥施肥方式对土壤氨挥发的影响. *华北农学报*, 2001, 16(2):83~86.
- [17] 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 黄彬香, 陈新平, 张福锁, Kogge Martin, Romheld Volker. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发. *中国环境科学*, 2007, 27(3):409~413.
- [18] 张玉铭, 胡春盛, 董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3):417~419.
- [19] 刘骅, 王讲利, 罗广华. 灰漠土长期定位施肥对耕层土壤碳氮平衡及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 在土壤剖面上积累的研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊):96~99.
- [20] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 王朝辉, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析. *中国农业科学*, 2002, 35(12):1493~1499
- [21] 田长彦, 冯国主编. 新疆棉花养分资源综合管理. 北京:科学出版社, 2008. 120~129.
- [22] 吕殿青, Ove Emteryd, 同延安, 张文孝. 农用氮肥的损失途径与环境污染. *土壤学报*, 2002, 39(增)77~89.
- [23] 唐启义, 冯光明. DPS 数据处理系统——试验设计, 统计分析, 数据挖掘. 北京:科学出版社, 2007.