

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.21560

# 长期施肥对黄淮海平原小麦氮素吸收及氨挥发的影响

张水清<sup>1</sup>, 张博<sup>1,2</sup>, 岳克<sup>1</sup>, 林杉<sup>2</sup>, 郭斗斗<sup>1</sup>, 郭腾飞<sup>1</sup>, 黄绍敏<sup>1\*</sup>

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002;

2. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 黄淮海平原是我国重要的粮食主产区, 针对该区域氮肥利用率低且损失率高等问题, 以国家土壤质量新乡观测实验站为研究平台, 监测长期不同施肥模式下小麦玉米轮作体系土壤氮素损失规律, 探讨减少黄淮海平原土壤氮挥发的科学施肥方式, 为提高氮肥利用效率提供理论依据。设置了对照(CK)、单施化肥(NPK)、单施有机肥(M)、秸秆还田配施化肥(NPK+S)、化肥增施有机肥(NPK+M) 5个处理, 于小麦季观测潮土氨挥发损失, 分析土壤矿质氮含量、pH值对氨挥发的影响。结果表明, 长期施肥对小麦产量及氮素吸收有显著影响。各施肥处理小麦产量均显著高于CK处理, 且籽粒、秸秆和颖壳产量以NPK+M处理最高, 分别达11.6、13.38和3.34 t·hm<sup>-2</sup>, 较NPK处理分别增加15.6%、39.1%和18.4%。各处理的小麦地上部吸氮量以NPK+M处理最大, 达306.67 kg·hm<sup>-2</sup>, 较NPK、NPK+S处理分别提高14.3%、44.7%。不同施肥处理对土壤氨挥发有显著影响, 小麦季土壤氨挥发速率峰值主要在施肥后1~4 d内, 其中NPK+S处理观测到的峰值高达N 0.40 kg·hm<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 其次为NPK+M处理。不同长期施肥处理小麦季土壤氨挥发损失总量达9.73~13.73 kg·hm<sup>-2</sup>, 且基肥期氨挥发总量(占施肥量52.7%~64.3%)高于追肥期; NPK+S处理小麦季土壤氨挥发总量最高(13.73 kg·hm<sup>-2</sup>), 与NPK处理相比显著提高24.5%。而NPK+M处理小麦季土壤氨挥发总量最低, 占施氮量的4.65%, 显著低于其他施肥处理。综上所述, 有机无机肥配施比单施化肥能显著提高小麦产量和氮肥吸收, 降低土壤氨挥发, 有利于实现作物高产与肥料高效利用, 可作为黄淮海平原小麦生产的优化施肥方式。

**关键词:** 氨挥发; 长期施肥; 潮土; 氮肥吸收; 黄淮海平原

黄淮海平原是我国小麦的主要产区, 该地区的小麦产量超过全国的60%<sup>[1]</sup>。过量施用化肥是黄淮海平原农田普遍存在的问题, 仅小麦季氮肥用量就高达350 kg·hm<sup>-2</sup>以上<sup>[2]</sup>。化肥施用过高和氮肥利用率低的现象<sup>[3]</sup>, 导致农田中的大量氮素通过气态损失和氮淋溶等途径进入环境, 加剧了农业面源污染, 该地区土壤以碱性或偏碱性为主, 这种碱性土壤氨挥发量较高, 氨挥发损失的氮最高可达施氮量的40%以上<sup>[4-6]</sup>。

不少研究表明, 土壤性质和农业管理措施等对农田氨挥发具有一定的影响<sup>[7]</sup>。潮土是黄淮海平原

农田较为常见的一种土壤类型, 大多为壤质或者砂质土壤, 潮土的pH值较高, 土壤矿化速率快, 这些特性导致其氨挥发损失量较大<sup>[8]</sup>。黄淮海平原主要农作物为小麦、玉米等, 在小麦-玉米轮作体系中, 农田氨挥发量大, 其损失量甚至占施氮总量的40%左右<sup>[9-11]</sup>。一方面, 过高的氨挥发, 降低了农作物的氮肥利用率; 另一方面, 氨挥发又是造成农业面源污染的重要原因之一<sup>[12]</sup>。作为农业大国, 我国畜禽粪便资源丰富, 每年资源量可达31.6×10<sup>8</sup> t, 其中的养分资源总量(以N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O合计)达到3832万t。如将这些畜禽粪便转化生产成有机肥后还田, 不仅有效缓解畜禽污染物对环境的污染, 还可显著提升地力, 增强农田生态保育功能<sup>[13]</sup>。不少研究表明, 有机肥配合化肥施用在培肥土壤地力、提高肥料利用率、增强养分综合利用率和增加粮食产量等方面效果显著<sup>[14]</sup>。河南封丘长期定位试验发现, 平衡施用化肥和有机肥配合化肥施用可显著降低氨挥发损失, 并有效提高氮肥利用率<sup>[15]</sup>。关于有机肥与化肥配施对土壤氨

收稿日期: 2021-10-22; 录用日期: 2021-12-20

基金项目: 河南省农业科学院优秀青年科技基金(2020YQ13); 2022年河南省农业科学院基础性科研项目(JC012); 河南现代农业产业技术体系建设专项资金(HARS-22-01-G4)。

作者简介: 张水清(1982-), 副研究员, 硕士, 主要从事土壤培肥与植物营养方面的研究。E-mail: zsq510@163.com。

通讯作者: 黄绍敏, E-mail: hsm503@126.com。

挥发损失的研究已有报道<sup>[10, 15]</sup>, 但是, 对长期定位试验中农田土壤氨挥发特征的系统性研究还存在一些不足, 为此, 有必要利用肥料长期定位试验平台, 对氮素损失途径进行量化研究。本研究依托国家土壤质量新乡观测实验站 31 年长期定位试验, 对黄淮海平原小麦季土壤氨挥发进行原位监测, 探讨有机无机肥配施对小麦氨挥发、籽粒产量和氮肥利用的影响, 以期通过合理施肥以协同提高小麦产量和氮肥利用率, 进而实现黄淮海地区农业的可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区域概况及试验材料

试验在国家土壤质量新乡观测实验站进行, 该站位于河南省新乡市平原新区 (35° 00' 28.43" N, 113° 41' 47.66" E), 常年降水量为 645 mm。长期监测试验于 1990 年正式开始, 土壤类型为潮

土, 质地为砂壤, 成土母质为黄河冲积物, 初始土壤理化性质如下: pH 值 8.1, 全氮、全磷、全钾和有机质分别为 0.64、0.65、16.9 和 10.6 g · kg<sup>-1</sup>, 碱解氮、有效磷和速效钾分别为 76.6、9.0 和 71.7 mg · kg<sup>-1</sup>。

本研究选取其中 5 个处理: 不施肥 (CK)、单施化肥 (NPK)、单施有机肥 (M)、秸秆还田配施化肥 (NPK+S)、有机肥与化肥配施 (NPK+M) 5 个处理, 每个处理 3 次重复, 小区面积 5 m × 8.5 m = 42.5 m<sup>2</sup>。

试验在 2018 年 10 月到 2019 年 6 月进行。2018 年 10 月 13 日进行小麦播种, 品种为郑麦 7698, 播种量为 165 kg · hm<sup>-2</sup>, 2019 年 5 月 30 日收获。小区所施化肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 基肥施肥方式为撒施后旋耕入地, 追肥方式为沟施, 深度为 10 cm, 其他田间管理按常规管理模式进行, 具体施肥量见表 1。试验基础土壤性质见表 2。

表 1 长期定位试验施肥方案

| 处理    | 施氮量<br>(N kg · hm <sup>-2</sup> ) | 尿素 (N kg · hm <sup>-2</sup> ) |     | 有机肥<br>(N kg · hm <sup>-2</sup> ) | 施磷量<br>(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg · hm <sup>-2</sup> ) | 施钾量<br>(K <sub>2</sub> O kg · hm <sup>-2</sup> ) | 秸秆     |
|-------|-----------------------------------|-------------------------------|-----|-----------------------------------|---|--|--------|
|       |                                   | 基肥期                           | 追肥期 |                                   |   |  |        |
| CK    | 0                                 | 0                             | 0   | 0                                 | 0   | 0  | 0      |
| NPK   | 165                               | 99                            | 66  | 0                                 | 82.5  | 82.5   | 0      |
| M     | 165                               | 0                             | 0   | 165.0                             | 0   | 0  | 0      |
| NPK+M | 280.5                             | 99                            | 66  | 115.5                             | 82.5  | 82.5   | 0      |
| NPK+S | 165                               | 99                            | 66  | 0                                 | 82.5  | 82.5   | 全量玉米秸秆 |

表 2 基础土壤性质 (2018 年 10 月)

| 处理    | 有机质<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 全氮<br>(g · kg <sup>-1</sup> ) | 有效磷<br>(mg · kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>(mg · kg <sup>-1</sup> ) |
|-------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| CK    | 13.39                          | 0.59                          | 3.10                            | 44.84                           |
| M     | 15.32                          | 0.89                          | 25.83                           | 83.93                           |
| NPK   | 16.21                          | 0.85                          | 15.30                           | 70.40                           |
| NPK+M | 20.60                          | 1.00                          | 49.58                           | 148.57                          |
| NPK+S | 18.22                          | 0.89                          | 18.05                           | 109.49                          |

### 1.2 试验方法

采用海绵通气法测定土壤氨挥发<sup>[16]</sup>, 分别于施肥后第 1、3、5、9、13、18、25、35、43、56、72、93 d 的 9: 00 收集海绵, 并换上刚浸好磷酸甘油的海绵, 海绵根据干湿程度 3 ~ 7 d 更换一次。所收集的海绵用 1 mol · L<sup>-1</sup> KCl 溶液 (50 mL) 反复按压浸提, 浸出液使用连续流动分析仪 (Seal An-

alytical AA3, 德国) 测定铵态氮含量。收集海绵时同时采集周边土壤 (0 ~ 20 cm 土层) 样品, 测定土壤铵态氮、硝态氮含量及 pH 值。

土壤矿质氮用 1 mol · L<sup>-1</sup> KCl 溶液浸提过滤 (水土质量比 5 : 1), 流动分析仪测定。土壤 pH 值采用 2.5 : 1 (水土比), 电位计法测定。土壤机械组成、容重、全氮、有效磷、速效钾采用实验室常规方法测定。

气温和降水量数据由实验站气象设备 (Watch-Dog2000 自动气象站, 美国) 收集所得, 小麦生育期气象数据见图 1。

### 1.3 数据计算与统计分析

氨挥发速率计算公式:

$$F = C / (S \times D) \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中: F 为土壤氨挥发速率, N kg · hm<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>; C 为海绵中铵态氮含量 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, mg); S 为收集装置

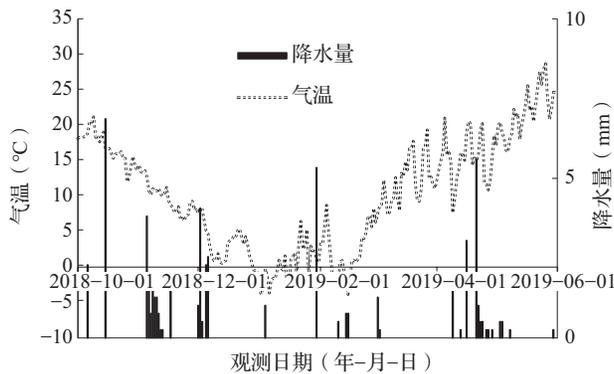


图1 试验期间气温和降水量日变化

横截面积,  $m^2$ ; D 为装置收集天数, d。氨挥发累积量 ( $N\ kg \cdot hm^{-2}$ ) 由每次采样氨挥发速率和收集天数乘积之和算得。

氨挥发损失率 (%) = 氨挥发累积量 / 施氮量的比值  $\times 100$  (2)

采用 Excel 2010 进行数据处理、SPSS 22.0 进行方差分析、多重比较和相关性分析、Origin 9.0 进行绘图。

表3 长期施肥对小麦产量及氮素吸收的影响

| 处理    | 籽粒产量<br>( $t \cdot hm^{-2}$ ) | 秸秆产量<br>( $t \cdot hm^{-2}$ ) | 颖壳产量<br>( $t \cdot hm^{-2}$ ) | 籽粒含氮量<br>(%)    | 秸秆含氮量<br>(%)    | 颖壳含氮量<br>(%)    | 地上部吸氮量<br>( $kg \cdot hm^{-2}$ ) |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| CK    | $1.67 \pm 0.50d$              | $3.03 \pm 0.68$               | $0.83 \pm 0.17$               | $1.87 \pm 0.09$ | $0.44 \pm 0.08$ | $0.60 \pm 0.03$ | $49.19 \pm 10.89d$               |
| M     | $5.94 \pm 0.35c$              | $8.26 \pm 1.64$               | $2.01 \pm 0.31$               | $1.56 \pm 0.06$ | $0.49 \pm 0.17$ | $0.60 \pm 0.17$ | $145.66 \pm 13.94c$              |
| NPK   | $9.70 \pm 0.34b$              | $9.62 \pm 1.29$               | $2.82 \pm 0.01$               | $2.05 \pm 0.11$ | $0.52 \pm 0.15$ | $0.66 \pm 0.08$ | $268.36 \pm 22.28ab$             |
| NPK+M | $11.60 \pm 1.37a$             | $13.38 \pm 1.20$              | $3.34 \pm 0.71$               | $1.86 \pm 0.30$ | $0.46 \pm 0.08$ | $0.81 \pm 0.04$ | $306.67 \pm 78.29a$              |
| NPK+S | $8.72 \pm 1.24b$              | $9.00 \pm 2.07$               | $2.71 \pm 0.46$               | $1.83 \pm 0.05$ | $0.40 \pm 0.08$ | $0.62 \pm 0.27$ | $211.87 \pm 33.06b$              |

注: 同一列小写字母不同表示各处理差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。下同。

## 2.2 长期施肥对土壤铵态氮与硝态氮的影响

长期不同施肥方式对小麦生育期内土壤铵态氮含量变化有显著影响 (图 2)。小麦基肥期, CK 处理土壤铵态氮含量变化幅度较小, 在  $1.00 \sim 5.09\ mg \cdot kg^{-1}$  之间。M 处理土壤铵态氮含量较低, 在施肥后第 1 d 含量升至最高, 从第 2 d 起略有下降后基本保持稳定。而 NPK 处理土壤铵态氮含量在施肥后第 1 d 显著高于 CK, 并在第 4 d 达到最高值, 为  $22.65\ mg \cdot kg^{-1}$ , 在第 5 d 迅速降至  $3\ mg \cdot kg^{-1}$  并保持稳定。NPK+M、NPK+S 处理土壤铵态氮含量变化幅度较大, 在第 2 d 铵态氮含量分别为  $22.04$ 、 $22.91\ mg \cdot kg^{-1}$ , 在第 5 d 分别为  $15.78$ 、 $32.54\ mg \cdot kg^{-1}$ , 并且分别在施肥后第 7、13 d 后降低至  $3\ mg \cdot kg^{-1}$  左右。在追肥期, 不同施肥

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥对小麦产量和氮素吸收的影响

长期不同施肥方式对小麦产量和氮素吸收有显著影响 (表 3)。CK 处理小麦籽粒与秸秆产量分别为  $1.67$ 、 $3.03\ t \cdot hm^{-2}$ , 而 NPK 处理, 小麦籽粒与秸秆产量分别为  $9.70$ 、 $9.62\ t \cdot hm^{-2}$ , 分别比 CK 处理增加了  $4.81$ 、 $2.17$  倍。M 处理小麦籽粒产量显著低于 NPK 处理 ( $P < 0.05$ )。NPK+M 处理小麦籽粒与秸秆产量分别为  $11.60$ 、 $13.38\ t \cdot hm^{-2}$ , 显著高于其他施肥处理 ( $P < 0.05$ )。NPK+S 处理, 小麦籽粒和秸秆产量与 NPK 处理相比无明显差异。从小麦地上部氮素吸收量来看, NPK+M 处理最高, 达到  $N\ 306.67\ kg \cdot hm^{-2}$ , 比 NPK 处理提升了  $14.28\%$ 。NPK 和 NPK+S 处理地上部吸氮量无显著差异, 均显著高于 M 和 CK 处理 ( $P < 0.05$ )。从籽粒吸氮量上看, 施肥处理间差异与地上部吸氮量相同。与 NPK 处理相比, NPK+M 处理籽粒吸氮量提升  $9.68\%$ , M、NPK+S 处理分别降低  $53.41\%$ 、 $20.05\%$ 。

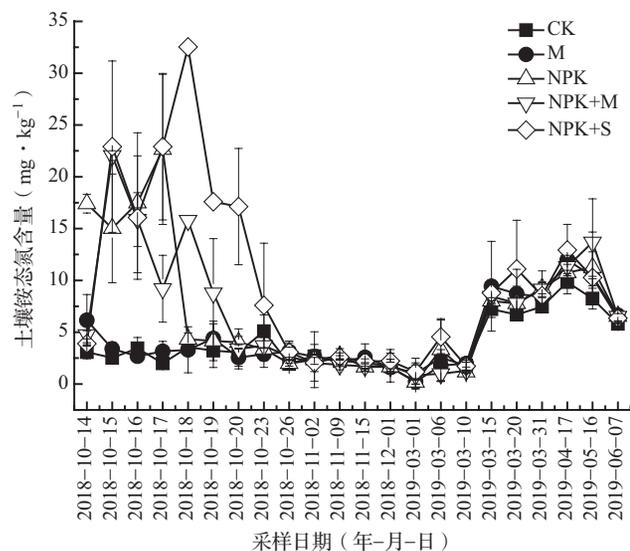


图2 监测期土壤铵态氮含量变化

处理土壤铵态氮含量均变化幅度较大,且变化趋势基本一致。CK处理铵态氮含量由于不施肥变化较小,平均值为 $7.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其他处理最高含量在 $11.24 \sim 13.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,无明显差异。

小麦基肥期,CK处理的土壤硝态氮变化平稳(图3),在 $1.97 \sim 8.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $5.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。M处理土壤硝态氮变化平稳,但显著高于CK处理,均值为 $15.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。NPK、NPK+M和NPK+S这三个处理硝态氮含量变化较大,但均呈现出缓慢增加再缓慢降低的趋势,在10月底至11月初土壤硝态氮达到最大值,依次为 $52.71$ 、 $55.87$ 、 $57.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从整个基肥期来看,NPK+M与NPK+S处理硝态氮含量差异不明显,但都高于NPK处理,而M处理低于NPK处理。在追肥期,各处理硝态氮含量均呈现出缓慢降低的趋势,最高含量出现在追肥后4~8d,由高到低依次为 $23.85$ (NPK+S)、 $21.88$ (NPK+M)、 $16.11$ (NPK)、 $13.77$ (M)、 $9.68$ (CK)  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,低于基肥期硝态氮含量,但处理间大小规律与基肥期相同,各处理硝态氮含量在5月中旬后基本趋于稳定,且差异不大。

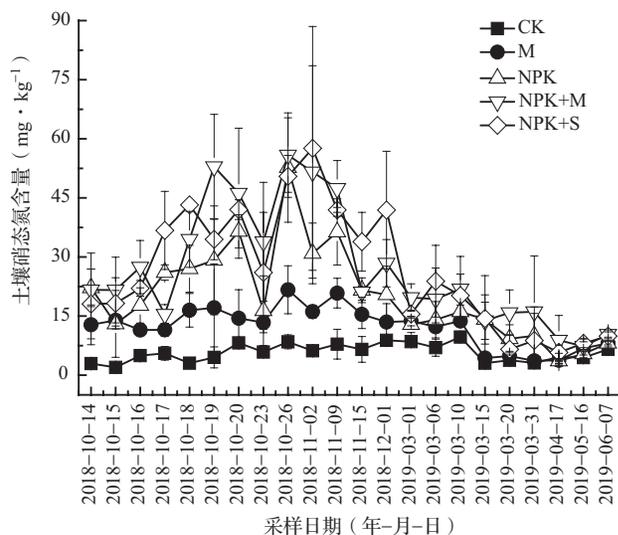


图3 监测期土壤硝态氮含量变化

### 2.3 长期施肥对土壤氨挥发速率的影响

小麦季土壤氨挥发速率如图4所示,在基肥期,CK处理氨挥发速率在前4d变化较大,最高为 $\text{N } 0.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,之后逐渐降低至 $\text{N } 0.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右并处于稳定状态,整个基肥期氨挥发速率平均为 $\text{N } 0.04 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。M处理在施肥后第1d挥发速率最高,为 $\text{N } 0.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,之后迅速下

降,在第4d后持续处于 $\text{N } 0.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右的水平。而NPK处理氨挥发速率在施肥后迅速增加,在第2d达到峰值,为 $\text{N } 0.19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,之后迅速降低。NPK+M处理氨挥发速率在第1d为 $\text{N } 0.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,前4d持续降低,之后缓慢上升,且起伏较大,在第5、9d出现2个峰值,分别为 $\text{N } 0.18$ 、 $0.27 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在11月底降至稳定水平。NPK+S处理氨挥发速率在施肥后第1d便达到峰值,为 $\text{N } 0.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,明显高于NPK处理,之后迅速降低,但从第5d又开始缓慢上升,直到11月初,最高可达到 $\text{N } 0.16 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在11月9日以后降低至稳定水平。

在追肥期,所有处理氨挥发速率都呈现出先升高后降低最后趋于平稳的趋势,其中CK处理氨挥发速率最高,为 $\text{N } 0.11 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,均值为 $\text{N } 0.05 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。施肥处理中除了M处理在施肥后第2d达到挥发峰值外,其他处理均在第4d到达峰值,M、NPK、NPK+M、NPK+S处理的氨挥发速率峰值依次为 $\text{N } 0.13$ 、 $0.11$ 、 $0.15$ 、 $0.39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,其中,NPK处理与CK无明显差异。各处理氨挥发速率达到峰值后开始迅速下降,均在3月中旬降至CK水平。

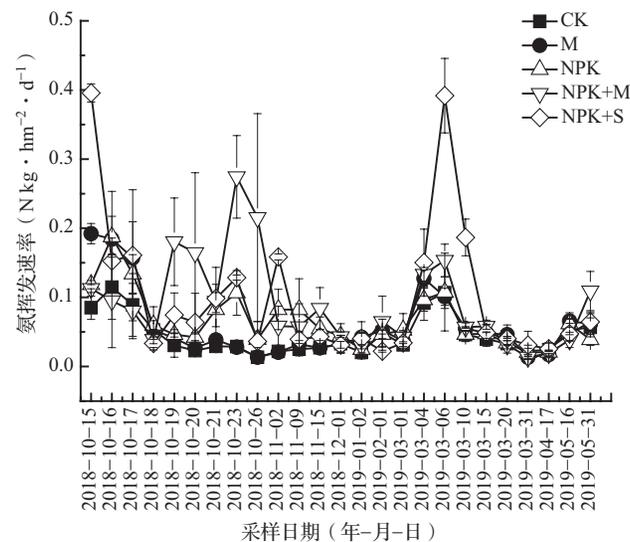


图4 小麦季土壤氨挥发速率动态变化

### 2.4 长期施肥对土壤氨挥发总量的影响

由表4可知,在整个监测期,CK处理氨挥发累积量为 $\text{N } 8.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,除M处理以外的其他施肥处理均显著高于CK ( $P < 0.05$ ),氨挥发累积量由高到低排列为NPK+S、NPK+M、NPK、M处理,依次为 $\text{N } 13.73$ 、 $13.03$ 、 $11.03$ 、 $9.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,占施氮量的比例依次为 $8.32\%$ 、 $4.65\%$ 、 $6.68\%$ 、 $5.90\%$ 。

将其他施肥处理分别与 NPK 处理相比, M 处理氨挥发累积量减少了 11.79%, 差异不显著, 占施氮量比例降低 0.78 个百分点, 而 NPK+M 处理氨挥发累积量增加了 18.13%, 差异也不显著, 占施氮量比例降低了 2.03 个百分点, NPK+S 处理氨挥发累积量增加了 24.48%, 差异显著 ( $P<0.05$ ), 占施氮量比例增加了 1.64 个百分点。

将不同施肥时期的氨挥发累积量进行比较可以发现, 同一处理的基肥期氨挥发累积量高于追肥期。在基肥期, NPK 处理氨挥发累积量为  $N\ 6.89$

$kg \cdot hm^{-2}$ , 占氨挥发累积总量的 62.47%, 而其他 3 个施肥处理的氨挥发累积量由高到低排列为 NPK+M、NPK+S、M, 依次为  $N\ 8.38$ 、 $7.71$ 、 $5.66\ kg \cdot hm^{-2}$ , 均与 NPK 处理无显著差异, 占氨挥发累积总量的 64.31%、56.15%、58.17%。在追肥期, NPK 处理氨挥发累积量为  $N\ 4.14\ kg \cdot hm^{-2}$ , 其他 3 个施肥处理的氨挥发累积量由高到低排列为 NPK+S、NPK+M、M, 依次为  $N\ 6.02$ 、 $4.65$ 、 $4.07\ kg \cdot hm^{-2}$ , 其中 NPK+S 处理显著高于其他处理 ( $P<0.05$ ), 而 M、NPK+M 处理与 NPK 处理无显著差异。

表 4 不同时期土壤氨挥发累积量和占施氮量比例

| 处理    | 基肥期                                 |               | 追肥期                                 |               | 合计                                  |               |
|-------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------|
|       | 氨挥发累积量<br>( $N\ kg \cdot hm^{-2}$ ) | 占施氮量比例<br>(%) | 氨挥发累积量<br>( $N\ kg \cdot hm^{-2}$ ) | 占施氮量比例<br>(%) | 氨挥发累积量<br>( $N\ kg \cdot hm^{-2}$ ) | 占施氮量比例<br>(%) |
| CK    | $4.42 \pm 0.67c$                    | —             | $3.97 \pm 0.34b$                    | —             | $8.40 \pm 0.35d$                    | —             |
| M     | $5.66 \pm 0.01bc$                   | 3.43          | $4.07 \pm 0.71b$                    | —             | $9.73 \pm 0.71cd$                   | 5.90          |
| NPK   | $6.89 \pm 0.92ab$                   | 6.96          | $4.14 \pm 0.18b$                    | 6.27          | $11.03 \pm 0.96bc$                  | 6.68          |
| NPK+M | $8.38 \pm 2.03a$                    | 3.91          | $4.65 \pm 0.48b$                    | 7.05          | $13.03 \pm 2.39ab$                  | 4.65          |
| NPK+S | $7.71 \pm 0.99a$                    | 7.79          | $6.02 \pm 1.24a$                    | 9.12          | $13.73 \pm 0.89a$                   | 8.32          |

## 2.5 氨挥发速率与土壤理化性质的偏相关分析

氨挥发速率与土壤铵态氮含量呈极显著正相关关系 (表 5), 相关系数为 0.14 ( $P<0.01$ ), 而与土壤硝态氮含量、pH 均呈负相关关系, 但未达到显著水平。以上说明, 壤铵态氮含量是影响土壤氨挥发速率的主要因素。

表 5 氨挥发速率与土壤理化性质偏相关分析

| 指标    | 氨挥发<br>速率 | 铵态氮<br>含量 | 硝态氮<br>含量 | pH |
|-------|-----------|-----------|-----------|----|
| 氨挥发速率 | 1         |           |           |    |
| 铵态氮含量 | 0.14**    | 1         |           |    |
| 硝态氮含量 | -0.10     | 0.19**    | 1         |    |
| pH    | -0.20     | -0.38**   | -0.66**   | 1  |

注: \*\* 表示相关关系达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。

## 3 讨论

### 3.1 有机肥与秸秆还田对土壤氨挥发的影响

秸秆还田是黄淮海平原常见的农艺措施, 该措施对土壤氨挥发有较大影响。研究表明, 农田土壤输入作物秸秆后土壤氨挥发损失加重, 损失量可达到作物残体氮含量的 39%<sup>[17-18]</sup>。这是由于有机物

料进入土壤后有利于微生物繁殖和活动, 促进土壤铵态氮的释放, 加剧了土壤氨挥发损失<sup>[19]</sup>。本试验条件下, 秸秆还田配施化肥处理土壤氨挥发累积量最高, 比单施化肥处理增加了 24.48%, 秸秆还田配施化肥处理土壤中铵态氮含量较高, 且铵态氮含量与土壤氨挥发速率呈显著正相关。研究表明, 土壤中的作物秸秆对黏土矿物吸附能力有一定的抑制作用, 从而降低其对铵态氮的吸附, 弱化土壤中游离态铵的固定, 增加铵离子的累积, 导致加大土壤氨挥发<sup>[20-21]</sup>。徐聪<sup>[22]</sup>研究发现, 秸秆还田不施氮处理对土壤氨挥发有一定的促进作用, 秸秆还田配施氮肥处理, 显著提高了土壤氨挥发, 该研究与本试验结果一致。另外, 土壤中的秸秆导致土壤孔隙增多、容重降低, 又进一步促进了土壤氨挥发<sup>[23]</sup>。

土壤中施入有机肥后一般需要较长时间的微生物矿化分解, 有机氮才转化为矿质氮, 从而影响土壤氨挥发<sup>[24]</sup>, 由于有机肥较长时间的矿化分解, 在此过程中, 受微生物固持与农作物吸收等因素的影响, 土壤铵态氮累积较慢, 因此, 土壤氨挥发速率较低。本研究表明, 施用有机肥可有效降低氨挥发, 有机肥全量替代化肥处理与单施化肥处理相比可降低氨挥发累积量的 11.79%; 郑凤霞等<sup>[25]</sup>利用

牛粪全量替代化肥的试验表明, 4年平均降低氨挥发累积量约60%, 施用有机肥处理降低农田氨挥发效果显著。有机肥与化肥配施也可以降低土壤氨挥发, 不仅因为有机肥自身分解缓慢, 还与有机质矿化释放有机酸形成的腐殖质能减缓尿素水解有关。有机肥和化肥配施处理土壤氨挥发低于化肥和秸秆还田处理, 在本试验化肥增施70%的有机肥处理中, 由于施氮量的增加, 导致土壤氨挥发累积量增加了18.13%, 但仍低于秸秆还田处理, 累积量占施氮量比例也仅为4.65%。

### 3.2 有机肥与秸秆还田对小麦产量和氮肥利用的影响

在优化施氮下增施有机肥增产效果明显, 小麦籽粒产量提升19.60%, 地上部吸氮量增加14.28%。大量研究已证实有机无机肥配施具有明显的增产效果。研究发现, 有机无机肥配施使小麦增产17.5%左右<sup>[26-27]</sup>, 玉米增产46.55%左右<sup>[28]</sup>。有机无机肥配施具有调控土壤氮素固持与释放的能力, 能够有效协调土壤氮素供应, 同时也能够提升小麦光合速率, 增加光合产物累积, 达到促进肥料效应、提高作物产量的作用<sup>[29-31]</sup>。而秸秆还田导致小麦减产10.10%, 这可能是由于秸秆与作物争氮, 导致氮肥损失过量有关, 控制秸秆还田量、减少秸秆还田的用量可有效改善这一问题<sup>[32]</sup>。本试验为第28年试验, 单施有机肥导致小麦减产11.79%, 有机肥肥效仍低于化肥。有机肥对作物产量的影响相对复杂, 因为有机肥矿化分解缓慢, 在长期定位试验初期产量较低, 但经过长期土壤培肥作用之后, 有机肥处理产量会超过化肥处理, 有些试验经过20年左右的有机肥培肥土壤, 作物产量可高于化肥, 但也有试验经过70多年才达到这一效果, 可能与施氮量、土壤类型和试验地气候等因素有关<sup>[33-35]</sup>。

## 4 结论

黄淮海平原小麦玉米轮作体系下, NPK处理小麦籽粒产量为 $9.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 地上部吸氮量为 $249.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。与NPK处理相比, NPK+M处理籽粒产量可增产19.59%, 达到显著差异, 地上部吸氮量可增加12.13%。但M、NPK+S处理籽粒产量和地上部吸氮量较低, M、NPK+S处理籽粒产量比NPK处理分别减产38.76%、10.10%, 地上部吸氮量分别降低46.59%、22.10%。

NPK处理土壤氨挥发累积量为 $11.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 占施氮量比例为6.68%。而M处理氨挥发累积量为 $9.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比NPK处理降低11.79%, 占施氮量比例降低0.78个百分点。NPK+M处理( $280.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量)氨挥发累积量为 $13.03 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 占施氮量比例比NPK处理降低2.03个百分点。NPK+S处理氨挥发累积量为 $13.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 比NPK处理增加24.48%, 差异显著, 占施氮量的比例增加1.64个百分点。氨挥发速率主要受土壤铵态氮含量的影响。综上, 有机无机肥配施比单施化肥能显著提高小麦产量和氮肥吸收, 降低氨挥发损失, 有利于实现作物高产与肥料高效利用, 可作为黄淮海平原小麦生产的优化施肥方式。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 国家统计局关于2018年粮食产量的公告 [EB/OL]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181214\\_1639544.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201812/t20181214_1639544.html), 2018-12-14.
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [4] 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 296-303.
- [5] 李凡, 李江叶, 郝晋珉, 等. 华北平原长期施肥和耕作对土壤氨挥发的影响 [J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1405-1414.
- [6] 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.
- [7] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展 [J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149-162.
- [8] 丁维新, 周凌云, 朱安宁, 等. 土壤学理论和技术创新促进区域农业持续发展和地方经济建设 [J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(12): 1401-1408.
- [9] 王秀斌. 优化施氮下冬小麦/夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [10] 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.
- [11] 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 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 18-24.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系下

- 氮素的损失途径分析 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (12): 1493-1499.
- [13] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国畜禽粪尿中养分资源数量及利用潜力 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (5): 1131-1148.
- [14] 郑福丽, 刘苹, 李国生, 等. 有机-无机肥协同调控小麦-玉米两熟作物产量及土壤培肥效应 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (21): 4355-4364.
- [15] 倪康, 丁维新, 蔡祖聪. 有机无机肥长期定位试验土壤小麦季氨挥发损失及其影响因素研究 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (12): 2614-2622.
- [16] 张水清, 张博, 岳克, 等. 生物质炭对华北平原 4 种典型土壤冬小麦生育前期氨挥发的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38 (1): 127-134.
- [17] Mannheim T, Braschkat J, Marschner H. Ammonia emissions from senescing plants and during decomposition of crop residues [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1997, 160: 125-132.
- [18] Larsson L, Ferm M, Kasimir-Klemetsson A, et al. Ammonia and nitrous oxide emissions from grass and alfalfa mulches [J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 1998, 51: 41-46.
- [19] Ruijter F J D, Huijsmans J F M, Rutgers B. Ammonia volatilization from crop residues and frozen green manure crops [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44 (28): 3362-3368.
- [20] 张四海, 曹志平, 胡婵娟. 添加秸秆碳源对土壤微生物生物量和原生动物的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19 (6): 1283-1288.
- [21] 吕宏菲, 马星霞, 杨改河, 等. 秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2020, 28 (4): 513-522.
- [22] 徐聪. 华北平原长期氮肥施用和秸秆还田下温室气体排放及氮素损失特征 [D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [23] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil [J]. *Plant and Soil*, 2014, 378: 279-294.
- [24] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (11): 1835-1846.
- [25] 郑凤霞, 董树亭, 刘鹏, 等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氨挥发损失的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (3): 567-577.
- [26] 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29 (5): 320-324.
- [27] 张建军, 樊廷录, 王勇, 等. 有机肥对陇东黄土旱地冬小麦产量和土壤养分的调控效应 [J]. 西北植物学报, 2009, 29 (8): 1656-1662.
- [28] 周慧, 史海滨, 徐昭, 等. 化肥有机肥配施对盐渍化土壤氨挥发及玉米产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (7): 1649-1656.
- [29] Palm C, Giller K, Mafongoya P, et al. Management of organic matter in the tropics: translating theory into practice [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61 (1): 63-75.
- [30] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 长期不同施肥对旱地小麦土壤氮素供应及吸收的影响 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (5): 885-892.
- [31] 赵隽, 董树亭, 刘鹏, 等. 有机无机肥长期定位配施对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26 (8): 2362-2370.
- [32] 张薇, 倪邦, 许秀春, 等. 氮肥使用对北方夏玉米季氨挥发的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41 (11): 5176-5184.
- [33] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值 [J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1 (1): 1-9.
- [34] 周宝库, 张喜林. 黑土长期施肥对农作物产量的影响 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2005, 21 (1): 37-39.
- [35] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42 (8): 2809-2819.

### Effects of long-term fertilization on the nitrogen absorption and ammonia volatilization of wheat in the Huang-Huai-Hai plain of China

ZHANG Shui-qing<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1, 2</sup>, YUE Ke<sup>1</sup>, LIN Shan<sup>2</sup>, GUO Dou-dou<sup>1</sup>, GUO Teng-fei<sup>1</sup>, HUANG Shao-min<sup>1\*</sup>  
(1. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou Henan 450002; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070)

**Abstract:** The Huang-Huai-Hai plain is an important major grain producing area in China. In this area, the utilization efficiency of nitrogen fertilizer is low and therefore a large amount of fertilizer is lost. To provide useful information for overcoming this problem, in this study, the National Soil Quality Observation and Experimental Station in Xinxiang was employed as our research platform to monitor the soil of a wheat-corn rotation system under long-term fertilization in different modes. Specifically, the nitrogen loss due to volatilization was monitored, with the purpose of exploring scientific fertilization strategies to reduce the soil ammonia volatilization in the Huang-Huai-Hai plain, and to provide knowledge for improving the utilization efficiency of nitrogen fertilizer. This study contained five treatments: control (CK), single application of chemical fertilizer (NPK), single application of organic fertilizer (M), straw materials that were returned to

field combined with chemical fertilizer (NPK+S), and chemical fertilizer plus organic fertilizer (NPK+M). The loss of soil ammonia due to volatilization was observed in the wheat growing season, and the effects of soil mineral nitrogen content and soil pH on soil ammonia volatilization were analysed. The results showed that long-term fertilization had a significant effect on wheat yield and nitrogen absorption. The yield of wheat in each fertilization treatment was significantly higher than that of CK treatment, and the yields of grain, straw and glume were the highest in NPK+M treatment, reaching  $11.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (a 15.6% increase compared to the value of the NPK treatment),  $13.38 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (39.1%) and  $3.34 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  (18.4%), respectively. The NPK+M treatment resulted in the largest nitrogen uptake by wheat shoots in all treatments, reaching  $306.67 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , which was 14.3% and 44.7% higher than that of NPK and NPK+S treatments, respectively. Different fertilization treatments had a significant impact on soil ammonia volatilization. The peak of soil ammonia volatilization rate in the wheat growing season occurred mainly within 1 ~ 4 d after fertilization, and NPK+S treatment induced the highest peak value, reaching  $0.40 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , followed by NPK+M treatment. In the wheat growing season, the total amount of soil ammonia loss due to volatilization under different long-term fertilization treatments reached  $9.73 \sim 13.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the total amount of ammonia volatilization in the basal fertilizer period (52.7% ~ 64.3% of the fertilization amount) was higher than that in the top-dressing period. The NPK+S treatment resulted in the highest level of soil ammonia volatilization in the wheat growing season ( $13.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), which was significantly increased by 24.5% compared with that of the NPK treatment. However, the total amount of ammonia volatilization from the soil in the wheat growing season under the NPK+M treatment only accounted for 4.65% of nitrogen application, which was significantly lower than other fertilization treatments. In summary, the combined application of organic and inorganic fertilizers can significantly increase wheat yield and nitrogen fertilizer absorption, and reduce soil ammonia volatilization; thus, this strategy might be able to promote crop yields and improve the efficiency of fertilizer utilization. Based on our results, we propose this combination as a potentially optimal fertilization strategy for wheat production in the Huang-Huai-Hai plain.

**Key words:** ammonia volatilization; long-term fertilization; fluvo-aquic soil; nitrogen absorption; Huang-Huai-Hai plain