

# 不同饲粮轮作模式生物质、粗蛋白生产潜力和氨排放研究

杨 玲, 廖文华, 高志岭, 王 森, 张金瑞, 赵英杰

(河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 通过田间试验研究了不同作物轮作模式中生物质、粗蛋白生产潜力和氨排放, 以探讨粮改饲进程中较优的种植模式。以冬小麦—夏玉米(W-SuM)轮作为基准, 探讨了华北地区黑麦草—夏玉米(R-SuM)、黑麦草—春玉米(R-SpM)、黑麦草—双季玉米(R-DM)和双季玉米(DM) 4种轮作体系的干物质、粗蛋白的生产潜力和氨气排放。结果表明: 黑麦草—双季玉米轮作模式较好, 干物质年产量和粗蛋白含量分别达到31 012, 2 529 kg/hm<sup>2</sup>, 比常规冬小麦—夏玉米体系分别增加了14.3%, 8.2%; 不同轮作模式下氨排放量为13.43~23.77 kg/hm<sup>2</sup>, 占肥料氮素投入的4.2%~5.6%, 排放顺序为R-DM>W-SuM>R-SpM>R-SuM>DM; 不同轮作模式氨排放的时间分布特征也存在明显差异, 双季玉米轮作体系(DM)的氨挥发主要发生在夏季, 其夏季贡献率明显高于其他4种轮作模式。黑麦草—双季玉米轮作体系在粗蛋白和干物质产量上可能具有较高的生产潜力。

**关键词:** 粮改饲; 轮作体系; 生物质; 粗蛋白; 氨挥发

**中图分类号:** S143.1<sup>+</sup>2; S19; S548 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0312-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.046

## Production Potentials of Biomass and Crude Protein, and Ammonia Volatilizations Under Different Forage-Crop Rotations

YANG Ling, LIAO Wenhua, GAO Zhiling, WANG Sen, ZHANG Jinrui, ZHAO Yingjie

(College of Resource and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000)

**Abstract:** To optimize the management practices during the transition period ‘Grain for forage’ in North China, the production potentials of biomass and crude protein and the ammonia (NH<sub>3</sub>) emissions under 4 different rotations were investigated with field experiment. A field experiment including 5 crop rotations was conducted, of which the traditional winter wheat-summer maize rotation (W-SuM) was considered the reference to evaluate the production potentials of biomass and crude protein in other rotations such as ryegrass-summer maize (R-SuM), ryegrass-spring maize (R-SpM), ryegrass-double summer maize (R-DM) and double summer maize (DM), and their NH<sub>3</sub> emissions were also measured *in situ* with Draeger-tube method (DTM). Results indicated that among the 5 crop rotations, the R-DM rotation had the greatest biomass (31 012 kg/hm<sup>2</sup>) and crude protein (2 529 kg/hm<sup>2</sup>) production, which were 14.3% and 8.2% greater respectively than those in the W-SuM rotation. The annual NH<sub>3</sub> volatilizations from these rotations ranged from 13.43 to 23.77 kg/hm<sup>2</sup>, accounting for 4.2%~5.6% of their N applications, which were both in an order of R-DM>W-SuM>R-SpM>R-SuM>DM. Meanwhile, the seasonal distributions of NH<sub>3</sub> emissions under different rotations differed, e. g. the contribution of NH<sub>3</sub> volatilization in summer season in DM rotation was much greater than those in other rotations. The ryegrass-double summer maize rotation was high likely to produce the greater biomass and crude protein.

**Keywords:** grain for forage; rotation system; biomass; crude protein; ammonia volatilization

“粮改饲”是促进我国粮食、经济作物和饲草料三元结构协调发展的重要举措, 需要在符合生态、经济和社会效益相统一的原则下, 将种植、养殖、草畜、产品安全和环境安全紧密结合起来, 这是推动“粮改饲”的重要保障。由于饲料作物与粮食作物的生产目标

存在巨大差异, 随着“粮改饲”的大力推动, 势必导致区域种植结构、作物品种以及氮素等养分管理措施的大幅改变, 因此探索合理的粮饲作物轮作模式并优化其养分管理措施, 是满足日益增长的饲料需求与养殖业环境影响最小化的重要途径<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2017-10-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41675151)

第一作者: 杨玲(1992—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事植物营养与肥料研究。E-mail: 568146251@qq.com

通信作者: 廖文华(1974—), 女, 副教授, 主要从事植物营养与调控研究。E-mail: liaowenhua@mail.hebau.edu.cn

迄今为止,我国针对小麦、玉米、水稻等粮食作物的轮作模式、生产潜力、养分管理及其环境效应的方面研究众多<sup>[2-5]</sup>,而在饲料作物方面,为创造更高的干物质产量和粗蛋白含量,当前研究多以创新不同粮饲复合种植模式、改善和提高其光能生产效率及光能利用效率为主<sup>[6]</sup>,这必将伴随氮素等养分资源管理措施的相应改变。研究表明,我国人为源氨年排放量持续升高,其中种植业氨排放的贡献率为 40%左右<sup>[7]</sup>,这不仅导致了我国大气 NH<sub>x</sub> 沉降的持续上升,同时也是形成硫酸铵和硝酸铵等 PM<sub>2.5</sub> 的限制性因素<sup>[8-9]</sup>。由于针对新轮作模式中氨挥发等氮肥气态损失的研究仍严重不足,难以准确评价新轮作模式对当地(如华北或京津冀地区)空气质量时空格局(如 PM<sub>2.5</sub>)的潜在影响<sup>[10-11]</sup>。因此,有必要创新饲料作物轮作模式以提高农业生产系统的粗蛋白和生物质生产潜力,同时也应针对其大气环境影响等方面展开综合研究<sup>[12]</sup>。

本研究利用田间小区试验,以冬小麦—夏玉米轮作模式为基准,探讨了其他 4 种轮作模式的干物质和粗蛋白的生产潜力,同时利用 DTM 技术测定了不同轮作模式下氮肥周期内氨气排放,核算了不同轮作模式下干物质和粗蛋白的氨排放强度,以期丰富我国饲料作物轮作模式,同时也为准确评价其大气环境效应、实现我国农业的持续健康发展提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河北省保定市河北农业大学标本园(38°10′—40°00′N,113°40′—116°20′E)。该地区位于太行山北部东麓,冀中平原西部,属暖温带大陆性季风气候,冬冷夏热,雨热同期,年降水量随降水季节分布不均。

年平均气温为 13 ℃,年无霜期 210 d,全年降水主要集中在 6—8 月,年际变化较大。平均海拔 18.4 m,地下水深 20~23 m。供试土壤为潮土,质地为重壤,土壤理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性状

| 土层深度/cm | pH   | 有机质/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) |
|---------|------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 0—30    | 7.72 | 12.64                     | 0.86                     | 61.42                      |
| 30—60   | 7.96 | 9.00                      | 0.44                     | 38.16                      |
| 60—90   | 8.11 | 7.07                      | 0.24                     | 20.98                      |

1.2 试验设计

试验共设 5 种轮作体系:(1)冬小麦—夏玉米轮作体系(W-SuM);(2)黑麦草—夏玉米轮作体系(R-SuM);(3)黑麦草—春玉米轮作体系(R-SpM);(4)黑麦草—双季玉米(饲用玉米)轮作体系(R-DM);(5)双季玉米(饲用玉米)轮作体系(DM)。每个处理重复 3 次。每个小区的面积为 3.0 m×3.3 m,试验从 2015 年 10 月开始。供试作物冬小麦为衡麦 444,黑麦草为冬牧 70,春玉米和夏玉米均为郑丹 958,饲用玉米为远缘 1 号。

施肥方案:试验中不同轮作模式下施用量的确定主要依据目标产量施肥法<sup>[13]</sup>,W-SuM、R-SuM、R-SpM、DM 处理种植两季作物,均按照两季作物的施肥量设定,施用磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)量为 180 kg/hm<sup>2</sup>,施用钾肥(K<sub>2</sub>O)量为 120 kg/hm<sup>2</sup>;R-DM 处理中有三季作物,其施肥量按三季作物优化施肥量设定,磷肥用量为 240 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>,试验处理的施氮肥(N)量,具体见表 2。

播种期的肥料均匀撒施后翻耕入土灌水,追肥期的肥料表施后灌水,其余田间管理和农户保持一致。

表 2 不同轮作模式的氮肥管理

| 施肥时期                     | 施肥时间<br>(年-月-日) | 施氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |       |       |      |     |
|--------------------------|-----------------|----------------------------|-------|-------|------|-----|
|                          |                 | W-SuM                      | R-SuM | R-SpM | R-DM | DM  |
| 冬小麦、黑麦草播种期               | 2015-10-18      | 100                        | 100   | 75    | 75   | —   |
| 冬小麦、黑麦草拔节期               | 2016-03-26      | 100                        | 100   | 75    | 75   | —   |
| 春玉米、双季玉米第一茬播种期           | 2016-04-23      | —                          | —     | 150   | 100  | 125 |
| 夏玉米播种期(春玉米、双季玉米第一茬大喇叭口期) | 2016-06-16      | 125                        | 125   | 150   | 100  | 125 |
| 夏玉米大喇叭口期(双季玉米第二茬播种期)     | 2016-07-29      | 125                        | 125   | —     | 75   | 75  |
| 合计                       |                 | 450                        | 450   | 450   | 425  | 325 |

注:—表示未施肥。

1.3 氨排放测定方法

采用德尔格氨管法(Draeger-tube method,简称 DTM)测定了不同施肥时期的氨挥发。该测定系统属于动态密闭箱原位测定法(图 1),具体包括 4 个不锈钢采样箱、手动抽气泵和连接采样室与手泵的特氟龙采样管(直径 0.5 cm)。每个采样箱的覆盖面积为 100 cm<sup>2</sup>,内部容积为 370 cm<sup>3</sup>,采样箱顶部有 1 个进气口和 1 个与采样管路相连的出气口。测定时,4 个

采样室的气体经两两混合后汇总至手动抽气泵(图 1)。手动抽气泵抽气速率为 100 cm<sup>3</sup>/次。每次测定前,需要压动抽气泵 20 次(空气流量约为 2 L)以清洗采样室和采样管路内残留气体。测定所用的德尔格氨检测管有 0.25~3 μL/L 和 3~30 μL/L 两种类型(Drgerwerk AG, Lübeck, Germany),分别用于低高排放和高排放速率时的氨气排放测定。氨检测管中填充固态酸性混合物和遇碱变蓝的 pH 指示剂溴

苯酚,氨检测管可进行 0.05~700 μL/L 氨气的检测。测定时压动手泵的次数以 10~50 次为宜,若超过检测管的检测上限时压动手泵次数仍低于 10 次,此时应该更换检测浓度更高的检测管,若压动手泵次数超过 50 次而读数仍未达到该检测管的检测下限,则读数为 0。测定结束后记录氨管上的读数、手泵压动次数和测定时间。每次氨排放测定时间约为 2~3 min,由于测定时间短,密闭罐的温度、辐射、水分等因素的变化很小,其影响可忽略不计<sup>[14]</sup>。

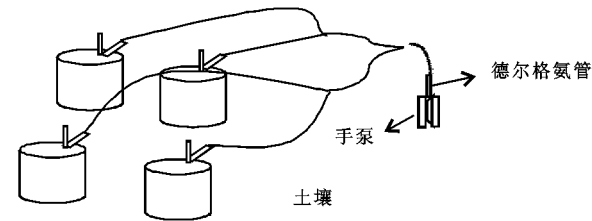


图 1 DTM 法测定氨挥发试验装置

1.4 氨挥发计算方法

DTM 氨挥发原位测定计算公式为:

$$F_{N_g}=V \mid \text{conc} \mid \times 10^{-6} \times \rho_{NH_3} \times U_N \times U_F \times U_Z$$

(1)

式中: $F_{N_g}$ 为氨排放量[N mg/(m<sup>2</sup>·h)]; $V$ 为抽气的体积(L); $\mid \text{conc} \mid$ 为氨气的浓度(μL/L); $\rho_{NH_3}$ 为该温度气压下 NH<sub>3</sub> 密度(mg/L); $U_N$ 为 NH<sub>3</sub> 换算为 N 的分子量换算因子; $U_F$ 为表面积换算因子(m<sup>2</sup>); $U_Z$ 为时间换算因子(h)。

由于公式(1)测定的是固定空气流量条件下的氨排放量,因此需要根据同时期的气象条件加以校正已获得实际排放速率,其中,利用公式(1)计算氨挥发测定时期中作物冠层高度低于 1 m 时的排放速率,而利用公式(2)计算冠层高度超过 1 m 时的氨排放速率:

低冠层  $\ln(NH_3 \text{ flux}_{IHF})=0.444 \times \ln(NH_3 \text{ flux}_{DTM})+0.590 \times \ln(V_{2m})$ 

(2)

高冠层  $\ln(NH_3 \text{ flux}_{IHF})=0.456 \times \ln(NH_3 \text{ flux}_{DTM})+0.745 \times \ln(V_{2m})-0.280 \times \ln(V_{0.2m})$ 

(3)

式中: $NH_3 \text{ flux}_{IHF}$ 表示由 IHF 微气象法测定的氨挥发量[N kg/(hm<sup>2</sup>·h)]; $V_{2m}$ 与  $V_{0.2m}$ 分别表示距地面 2 m 与 0.2 m 的风速(m/s); $NH_3 \text{ flux}_{DTM}$ 表示 DTM 测定的氨挥发量  $F_{N_g}$ [N kg/(hm<sup>2</sup>·h)]。

1.5 植株样品采集与测定

产量测定:冬小麦夏玉米轮作体系(W-SuM)的籽粒和秸秆产量测定采用了整个小区实收测产,数 1 m 双行穗数、穗粒数、千粒重分析其产量构成。其他各处理则分别在适宜收获期(以适合饲用为标准)收割整个小区的植株获得鲜样生物量,取有代表性的植株带回实验室,称取其鲜重后放入档案袋,烘箱 105 ℃ 杀青,75

℃ 烘至恒重,测定其含水量,获得干物质产量。

干物质偏生产力=干物质产量/氮肥施用量 (4)

粗蛋白测定:采用常规方法测定饲料作物整株的全氮含量,并利用公式(5)计算粗蛋白含量:

植株粗蛋白=植株干物质产量×植株含氮量(%)×6.25 

(5)

粗蛋白偏生产力=粗蛋白产量/氮肥施用量 (6)

土壤硝态氮累积量(kg/hm<sup>2</sup>)=容重(g/cm<sup>3</sup>)×土壤厚度(cm)×硝态氮含量(mg/kg)/10 

(7)

植株吸氮量(kg/hm<sup>2</sup>)=∑植株各组成部分干物质质量×各组成部分含氮量 

(8)

土壤氮素盈余量<sup>[4]</sup>(kg/hm<sup>2</sup>)=生育期施肥量+土壤起始 N<sub>min</sub>+大气氮沉降-植株携出量-收获后土壤残留 N<sub>min</sub>

(9)

其中,大气氮沉降数据参考张颖等<sup>[15]</sup>的研究结果,其余数据均为实测。

1.6 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 18.0 对数据进行相关性分析,显著性差异分析采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同轮作体系的干物质与粗蛋白产量

由表 3 可以看出,5 种轮作模式的干物质生产总量变化范围为 19 643~31 012 kg/hm<sup>2</sup>。

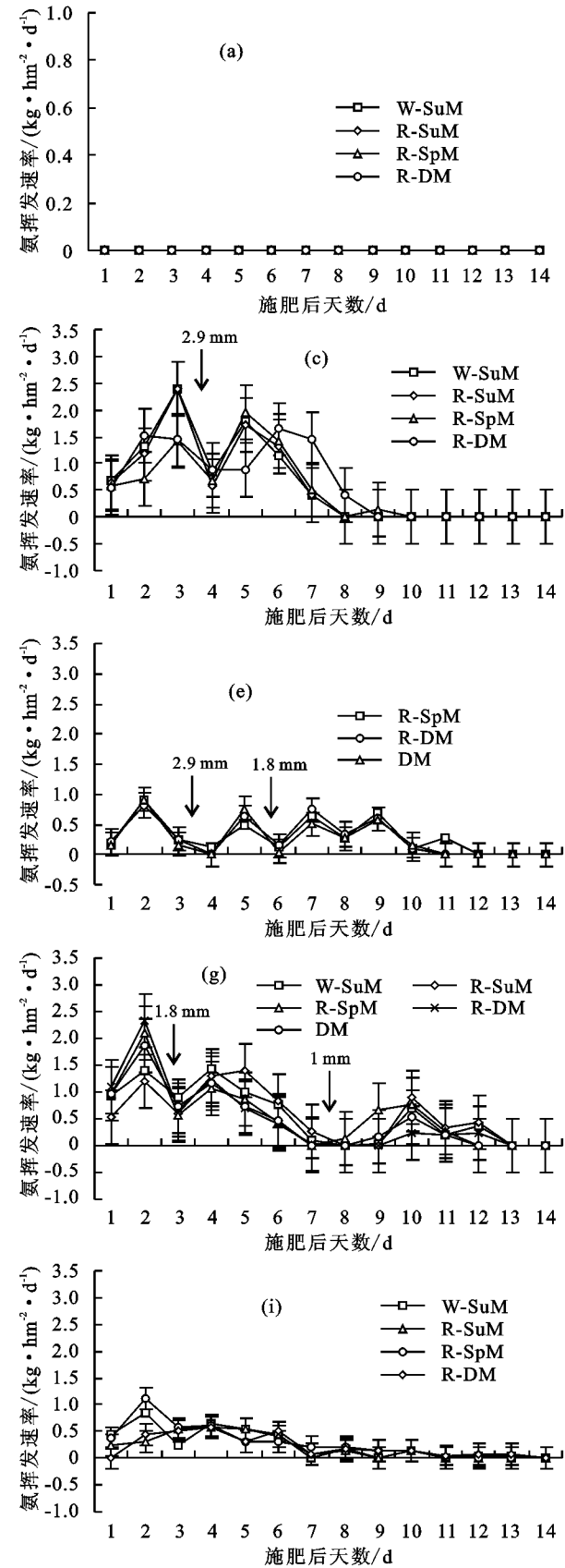
表 3 不同轮作体系各作物干物质及粗蛋白产量

|                    |        | 单位:kg/hm <sup>2</sup> |        |       |        |
|--------------------|--------|-----------------------|--------|-------|--------|
| 轮作模式               | 作物类型   | 粗蛋白产量                 |        | 干物质产量 |        |
|                    |        | 每季单茬                  | 年合计    | 每季单茬  | 年合计    |
| 冬小麦—夏玉米<br>(W—SuM) | 冬小麦    | 1165                  | 2338a  | 15298 | 27125b |
|                    | 夏玉米    | 1173                  |        | 11827 |        |
| 黑麦草—夏玉米<br>(R—SuM) | 黑麦草 1  | 351                   | 1800b  | 3660  | 20178c |
|                    | 黑麦草    | 195                   |        | 4472  |        |
|                    | 2 夏玉米  | 1254                  |        | 12046 |        |
| 黑麦草—春玉米<br>(R—SpM) | 黑麦草    | 361                   | 2158ab | 3912  | 19643c |
|                    | 春玉米    | 1797                  |        | 15731 |        |
| 黑麦草—双玉米<br>(R—DM)  | 黑麦草    | 367                   | 2529a  | 4062  | 31012a |
|                    | 饲用玉米 1 | 1414                  |        | 13877 |        |
|                    | 饲用玉米 2 | 748                   |        | 13073 |        |
| 双玉米<br>(DM)        | 饲用玉米 1 | 1342                  | 1713c  | 12556 | 20352c |
|                    | 饲用玉米 2 | 371                   |        | 7896  |        |

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

与常规轮作模式 W-SuM(27 125 kg/hm<sup>2</sup>)相比,R-SuM、R-SpM、DM 处理的干物质质量分别降低了 25.6%、27.6%、25.0%,达到显著性差异;R-DM 产生的干物质产量最高,达到 31 012 kg/hm<sup>2</sup>,比传统模式 W-SuM 显著增加了 14.3%,同时也显著高于 R-SuM、R-SpM、DM 处理。同样,5 种轮作模式粗蛋白产量变化范围为 1 713~2 529 kg/hm<sup>2</sup>,与常规轮作模式 W-SuM(2 338 kg/hm<sup>2</sup>)相比,R-SuM 和 DM 处理分别降低了 23.0%和

26.7%, 差异达到显著水平, 而 R-SpM 和 R-DM 分别比常规轮作模式降低 7.7% 和增加 7.6%, 均未达到显著性差异。



注:(a)、(c)、(e)、(g)、(i)分别为10月18日、3月23日、4月26日、6月16日和7月29日施肥后不同处理氨排放速率;(b)、(d)、(f)、(h)、(j)分别为上述不同时期氨累积排放。

2.2 不同轮作体系下氨挥发的动态变化及累积量

图 2 汇总了不同轮作模式下氮肥施用后的氨挥发速率动态变化和累积排放。

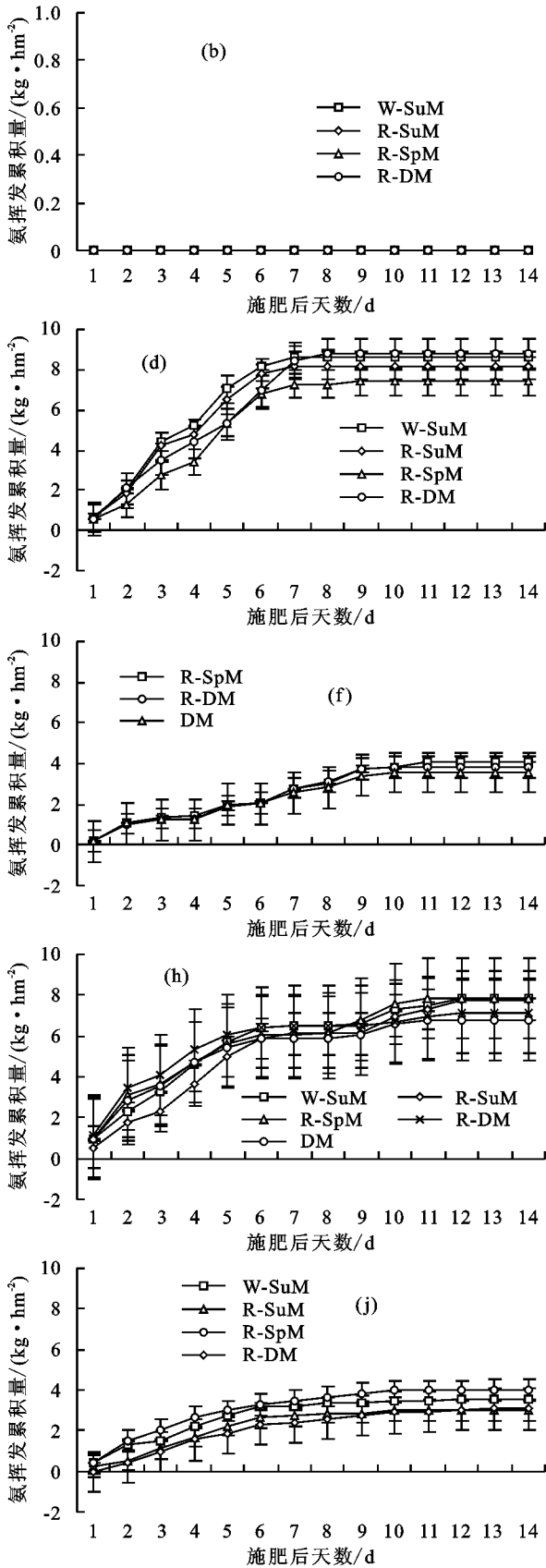


图 2 不同时期氨挥发动态特征与累积挥发量

由图 2a 和图 2b 可知,冬小麦与黑麦草季氮肥作为基肥施入土壤后未检测到氨挥发。与之相比,3 月 23 日不同处理氮肥施用均为表层撒施后立即灌水,其氨挥发速率的动态特征和累积排放量与基肥时期呈现出明显的差异(图 2c 和 2d)。由图 2c 可知,所有处理在施肥 1 天后检测到了氨挥发,W-SuM、R-SuM 轮作模式中在第 3 天出现最高峰,氨挥发高峰值分别为 2.39、2.38 kg/(hm<sup>2</sup>·d),随后这 2 个处理的氨挥发分别在第 5、6 天再次出现高峰,同时 R-SpM、R-DM 轮作模式的氨挥发速率也出现最高峰 1.95、1.64 kg/(hm<sup>2</sup>·d)。由图 2e 和图 2f 可以看出,在双季玉米第一茬和春玉米播种期基肥施用后,氨挥发速率呈现出波峰和波谷交替出现的特征,

这可能由该时期频繁的降雨所致(图 3)。此外,由图 2g 和图 2h 可以看出,在夏玉米播种期及春玉米和双季玉米第一茬的大喇叭口期施肥后的第 2 天,R-SpM、R-DM、DM 轮作模式的氨挥发速率均达到最高为 2.11、2.33、1.86 kg/(hm<sup>2</sup>·d),而 W-SuM、R-SuM 的氨挥发速率则在第 4、5 天出现最高峰,排放速率达到 1.43、1.39 kg/(hm<sup>2</sup>·d),推测这也可能是由于在施肥后第 3、4 天均有少量的降雨(图 3),从而促进尿素的水解导致氨气持续产生。由图 2i 和图 2j 可以看出,在 7 月 29 日施肥后不同处理的氨挥发呈现出先升高后降低的趋势。从图 2d~图 2i 可以看出,各处理的氨挥发主要发生在施肥后 7~10 天。

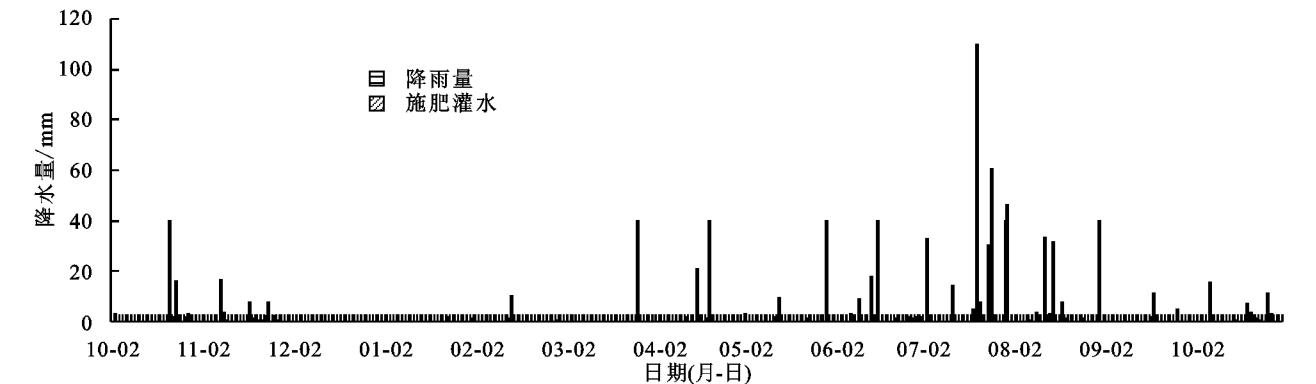


图 3 试验期间降水量与施肥灌水量

2.3 不同轮作体系下各时期氨挥发累积量

表 4 为试验期间不同轮作模式下施肥后的氨挥发量。不同轮作模式周年氨排放量变存在较大差异,其中 R-DM 的氨挥发量最高(23.77 kg/hm<sup>2</sup>),W-SuM、R-SuM 和 R-SpM 的氨挥发量基本相当,而 DM 处理氨挥发量最低(13.43 kg/hm<sup>2</sup>)。在 W-SuM 处理中,冬小麦和夏玉米季的氨挥发量分别为 8.60、11.38 kg/hm<sup>2</sup>,分别占年排放总量的 43.04%和 56.96%,

与之相似,R-SuM 处理中黑麦草季和夏玉米季氨排放贡献率分别为 43.28%和 56.72%;R-SpM 黑麦草季和玉米季占该时期累积挥发量的比率分别为 38.28%,61.72%;R-DM 黑麦草季和玉米季占该时期累积挥发量的比率分别为 37.06%,62.84%;而 DM 处理的氨挥发全部发生在玉米生长季。整体看来,不同轮作模式下的氨挥发均以玉米季的氨挥发为主,约占年排放总量的 56.72%~100%。

表 4 不同轮作模式下各时期累积氨挥发量 单位:kg/hm<sup>2</sup>

| 施肥时期                    | 冬小麦—夏玉米<br>(W-SuM) | 黑麦草—夏玉米<br>(R-SuM) | 黑麦草—春玉米<br>(R-SpM) | 黑麦草—双玉米<br>(R-DM) | 双玉米<br>(DM) |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|
| 冬小麦、黑麦草播种期              | nd                 | nd                 | nd                 | nd                | —           |
| 冬小麦、黑麦草拔节期              | 8.60               | 8.21               | 7.40               | 8.81              | —           |
| 春玉米及双玉米第一茬播种期           | —                  | —                  | 4.07               | 3.81              | 3.56        |
| 夏玉米播种期(春玉米及双玉米第一茬大喇叭口期) | 7.83               | 7.76               | 7.86               | 7.15              | 6.81        |
| 夏玉米大喇叭口期(双玉米第二茬播种期)     | 3.55               | 3.00               | —                  | 4.00              | 3.06        |
| 合计                      | 19.98              | 18.97              | 19.33              | 23.77             | 13.43       |

注:nd 表示施肥后未检测到氨排放;—表示未施肥,没有测定氨排放。

2.4 不同轮作体系下的氮素效率

为综合分析不同轮作模式下的生产潜力及氨排放损失,本研究参考粮食作物生产中偏生产力的概念<sup>[16]</sup>。由表 5 可知,与常规冬小麦—夏玉米轮作 W-SuM 相比,R-SuM 和 R-SpM 轮作模式干物质偏生产力分别为 44.84、43.65 kg/kg,显著降低了 26%~28%,DM 与 W-SuM 基本相同,而 R-DM 却增加了 21%,差异达显著水平;与此同时,与 W-SuM 相比,

R-SuM 和 R-SpM 轮作模式粗蛋白偏生产力分别为 4.00、4.97 kg/kg,分别降低了 23%和 8%,其中前者达到了显著水平,DM 与 W-SuM 基本相同,但 R-DM 却增加了 14%。从不同轮作模式下氮肥的氨氮损失比例来看,R-DM 处理的损失系数最高,达 5.6%,分别比 W-SuM、R-SuM、R-SpM 和 DM 处理升高了 21%,25%,23%和 27%,差异均达显著水平。

表 6 为不同饲粮轮作模式的氮素表观盈余量,其

中 R-SuM 的氮盈余最高为 239 kg/hm<sup>2</sup>, R-DM 的 N 盈余最少为 91 kg/hm<sup>2</sup>, 各处理的氨挥发量随施氮量的增加而增加, 但与氮素盈余量之间未发现明显的相关性。由表 6 可知氨挥发和植株吸氮量与土壤残留 N<sub>min</sub> 的关系, 同时可得出 R-DM 轮作模式中氨挥发占 N 输出的比例较低, 为 3.7%。可见 R-DM 轮作模式可获得较高的生物量和植株吸氮量, 说明该轮作模式的氮肥利用率较高。

表 5 不同轮作模式下干物质、粗蛋白生产力及氨挥发损失

| 处理             | 干物质偏生产力/ 粗蛋白偏生产力/ 氨挥发  |                        |       |
|----------------|------------------------|------------------------|-------|
|                | (kg·kg <sup>-1</sup> ) | (kg·kg <sup>-1</sup> ) | 损失率/% |
| 冬小麦—夏玉米(W-SuM) | 60.28b                 | 5.20ab                 | 4.4b  |
| 黑麦草—夏玉米(R-SuM) | 44.84c                 | 4.00c                  | 4.2b  |
| 黑麦草—春玉米(R-SpM) | 43.65c                 | 4.79bc                 | 4.3b  |
| 黑麦草—双玉米(R-DM)  | 72.97a                 | 5.95a                  | 5.6a  |
| 双玉米(DM)        | 62.62b                 | 5.27ab                 | 4.1b  |

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平。

表 6 不同轮作模式下氮素平衡

单位: kg/hm<sup>2</sup>

| 处理             | N 投入 |       |                     | N 输出  |                     |     | N 盈余 |
|----------------|------|-------|---------------------|-------|---------------------|-----|------|
|                | 施氮量  | 大气氮沉降 | 播前 N <sub>min</sub> | 植株吸氮量 | 残留 N <sub>min</sub> | 氨挥发 |      |
| 冬小麦—夏玉米(W-SuM) | 450  | 38    | 254                 | 292   | 259                 | 20  | 171  |
| 黑麦草—夏玉米(R-SuM) | 450  | 38    | 253                 | 227   | 256                 | 19  | 239  |
| 黑麦草—春玉米(R-SpM) | 450  | 38    | 226                 | 346   | 209                 | 19  | 140  |
| 黑麦草—双玉米(R-DM)  | 475  | 38    | 227                 | 405   | 220                 | 24  | 91   |
| 双玉米(DM)        | 275  | 38    | 264                 | 284   | 109                 | 13  | 171  |

3 讨论

3.1 氨挥发特征与氮素损失

研究表明, 农田氨挥发不仅受氮素形态及施氮量的影响, 与温度、降水等环境因素也密切相关<sup>[5]</sup>。本研究在冬小麦播种期未检测到氨挥发, 究其原因可能是: (1) 基肥施入后翻耕会导致表层土壤氨挥发的底物 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 的浓度低 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 的浓度普遍偏低 0.3 mg/kg), 如张玉铭<sup>[17]</sup>研究表明, 基肥期氨挥发量仅占施肥量的 0.9%, 远低于小麦追肥期氨挥发; (2) 施肥后恰值低温阶段 (日平均气温 3℃), 可能会大幅降低土壤脲酶活性, 延缓尿素水解从而降低土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 的浓度<sup>[18]</sup>; (3) 施肥后灌水可能将尿素及其水解后的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 带入土壤深层, 不利于氨挥发<sup>[19]</sup>。

还有研究表明, 不同季节间氨挥发速率差异明显, 本研究冬小麦季基肥和追肥后的氨挥发差异与张玉铭等<sup>[20]</sup>研究结果基本一致, 导致夏季氨挥发速率高的原因可能是: (1) 夏季雨水较充足且土壤温度较高, 导致氨扩散率加快, 同时适宜的含水量会导致土壤中微生物活性增强, 促进氨挥发进一步损失<sup>[21-22]</sup>; (2) 与基肥相比, 夏玉米季氮肥施用均以表施为主, 这在一定程度上促进了农田氨挥发<sup>[21]</sup>。

整体来看, 本研究中夏季各处理施肥后的氨挥发特征与华北山前平原对氨挥发研究基本吻合<sup>[23-24]</sup>。此外, 本研究采用 DTM 法监测到的氨挥发结果与王朝辉等<sup>[25]</sup>采用的通气法监测出的氨挥发速率结果接近, 但均低于苏芳等<sup>[26]</sup>采用风洞法监测华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系氨挥发速率。本研究的氨挥发损失率在 4.1%~5.6%, 这与刘学军等<sup>[27]</sup>的研究中冬小麦/夏玉米轮作体系中施入尿素氮肥后的氨挥发损失率 (4%~7%) 较为接近, 但明显低于该轮作中施用碳酸氢铵后的氨损失率 (17.5%~75.0%)<sup>[22]</sup>。根据前人研究<sup>[20-21]</sup>可知, 本研究若采用硝态氮肥料替代尿素、玉米追肥氮素

深施替代表施等施肥技术, 进一步优化氮肥施用量, 还可以不同程度的降低各轮作体系的氨挥发量。

3.2 生物质及粗蛋白潜力与氮素效率

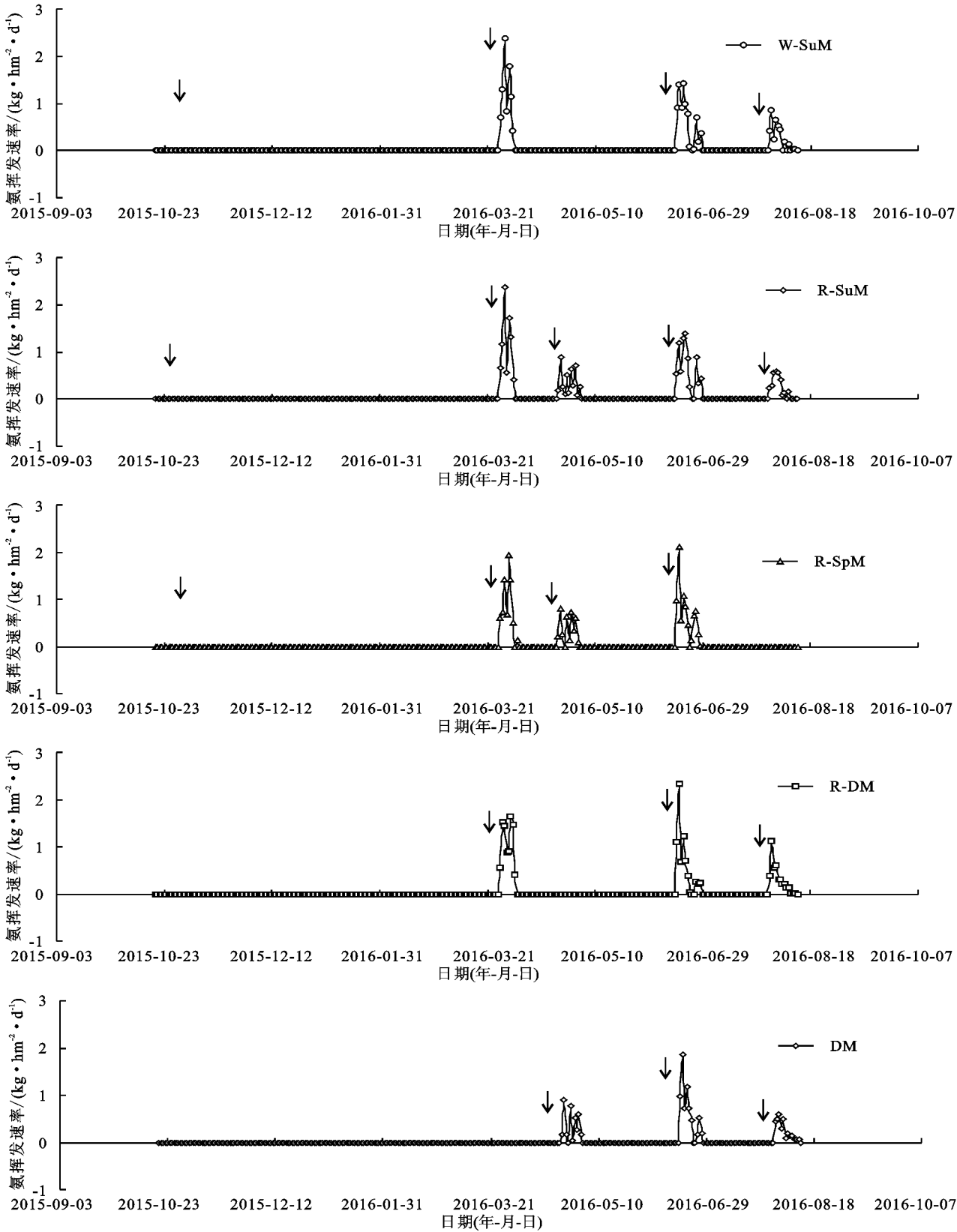
本研究发现, 与常规轮作模式 W-SuM 相比, R-SuM 轮作中夏玉米季的干物质量与 W-SuM 轮作模式基本相同, 且黑麦草的 2 次刈割干物质总量与许能祥等<sup>[28]</sup>和丁成龙等<sup>[29]</sup>研究基本相同, 但显著低于冬小麦季的干物质量, 表明黑麦草的干物质生产潜力比较低, 这与石鹏飞等<sup>[1]</sup>的研究结果基本相同。本研究还发现, R-DM 两季饲用玉米的干物质量显著高于 R-SpM 春玉米的干物质量, 且有研究表明饲用玉米的粗蛋白含量明显高于成熟期收割的春玉米和夏玉米<sup>[30]</sup>, 这是导致这 2 种轮作模式干物质量和粗蛋白量显著性差异的主要原因; 此外, DM 与 R-DM 的黑麦草季的生物量差异也是导致这 2 种轮作模式粗蛋白量差异性显著的重要原因之一。

目前已经开展的饲料作物轮作模式的探索研究<sup>[1,31-32]</sup>一方面是为了充分挖掘当地的土壤、气候等生产潜力, 同时也在努力寻找环境风险和资源消耗最小的种植和管理模式。石鹏飞等<sup>[1]</sup>探索了 7 种不同轮作模式的生产效果、粗蛋白生产量等内容, 发现春玉米—夏玉米轮作模式干物质生产量最高, 而春玉米—黑麦草以及高丹草—黑麦草的粗蛋白生产量最高。此外, 王大鹏等<sup>[31]</sup>研究结果表明, 华北平原将一年两熟 (如冬小麦—夏玉米轮作) 改为两年三熟和一年一熟会导致产量下降 16%~27%, 但同时也会降低作物耗水 24%~31%, 提高灌溉水利用效率 58%~172%。与上述研究相比, 本研究的 5 种轮作模式中均以 R-DM 轮作体系产生的干物质偏生产力和粗蛋白偏生产力为最高, 可提供更多精饲料和粗饲料, 但该轮作模式的氮肥消耗量和氨挥发量也最高。未来针对该种模式, 应进一步展开肥料管理研究, 在维持产量前提下进一步优化氮肥用量, 降低其环境效应, 从而为适应华北平原“粮改饲”规模化农业发展的高效种植制度<sup>[33]</sup>。

3.3 氨排放时间变化的潜在大气环境影响

研究表明,大气氨浓度是影响二次粒子浓度的大小主要因素<sup>[8-9]</sup>,本研究及前人研究均表明,农田氨挥发主要发生在施肥后 1~2 周内<sup>[18-23]</sup>,由于大气氨易于发生沉降,在大气中传输距离也较短<sup>[34]</sup>,因此农田

氨挥发对大气质量的可能影响具有较强的时效性和地域性。与常规粮食作物轮作模式相比,饲料作物的施肥时间通常存在较大差异,且与冬小麦—夏玉米轮作(W-SuM)相比,其余不同轮作模式的氨排放时间分布特征也各不相同(图 4)。



注:图中箭头表示施肥时间。

图 4 不同轮作模式的氨排放时间分布特征

以发生雾霾频率较高的秋冬季为例,双季玉米轮作模式(DM)由于在秋末冬初不施肥,不存在明显的氨排放,因此该轮作模式可能对秋冬季雾霾的形成具有一定的减缓作用;尽管 R-SuM、R-SpM 和 DM 轮作模式在夏季排放量比较高,但氨不是夏季二次粒子形成的关键组分,故对大气灰霾形成的影响可能较小。上述分析表明,实时精准估算不同区域的氨排放已然成为预测灰霾污染的发生时间和强度的重要条件,而随着不同饲料作物种植模式的持续推广和播种面积占比的逐渐增加,可能会对当前空气氨分布时空格局产生影响,增加预测空气污染的难度。因此,在未来应该开展更多饲料作物轮作体系的氨挥发研究,这将为准确评价种植业的大气环境影响奠定坚实的基础。

## 4 结 论

本研究以冬小麦—夏玉米(W-SuM)轮作为基准,探讨了华北地区黑麦草—夏玉米(R-SuM)、黑麦草—春玉米(R-SpM)、黑麦草—双季夏玉米(R-DM)以及双玉米(DM)轮作体系4种轮作模式的干物质和粗蛋白的生产潜力和氨排放。主要结论为:

(1)所有轮作模式中以黑麦草—双玉米轮作模式最优,其中,干物质和粗蛋白年产量分别达到31 012, 2 529 kg/hm<sup>2</sup>,比常规冬小麦—夏玉米体系分别增加了14.3%和8.2%;

(2)不同轮作模式下氨排放量和氨氮损失系数范围分别为13.43~23.77 kg/hm<sup>2</sup>和4.2%~5.6%,各处理表现为R-DM>W-SuM>R-SpM>R-SuM>DM;

(3)不同轮作模式氨挥发的年内季节分布存在明显差异,双玉米(DM)轮作体系的氨挥发主要发生在夏季,其夏季贡献率明显高于其他4种轮作模式。

综上,黑麦草—双玉米(饲用玉米)轮作体系在粗蛋白干物质产量上可能具有较高的生产潜力,对华北地区“粮改饲”发展具有一定的参考价值;未来不同饲料作物轮作模式下的氨排放时间分布特征对大气环境质量的影响值得进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 石鹏飞,杨东玉,郑媛媛,等. 华北平原粮饲复合种植模式[J]. 草业科学,2015,32(12):2107-2113.
- [2] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [3] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦—夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报,2007,46(4):684-697.
- [4] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应与氮素平衡研究[J]. 中国农业科学,2002,35

- (11):1361-1368.
- [5] Zhao X N, Hu K L, Li K J, et al. Effect of optimal irrigation, different fertilization, and reduced tillage on soil organic carbon storage and crop yield in the North China plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science,2013,176(1):89-98.
- [6] 李婧,李玲玲,张立健,等. 氮肥用量对粮饲兼用玉米产量和饲用品质形成的影响[J]. 草业科学,2015,32(3):442-449.
- [7] Gu B, Ju X, Chang J, et al. Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2015,112(28):8792-8797.
- [8] Wu Y Y, Gu B J, Erisman Jan W, et al. PM<sub>2.5</sub> pollution is substantially affected by ammonia emissions in China[J]. Environmental Pollution,2016,218:86-94.
- [9] 薛文博,许艳玲,唐晓龙,等. 中国氨排放对 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响[J]. 中国环境科学,2016,36(12):3531-3539.
- [10] Wen L, Chen J, Yang L, et al. Enhanced formation of fine particulate nitrate at a rural site on the North China Plain in summer: The important roles of ammonia and ozone [J]. Atmospheric Environment, 2015, 101 (1):294-302.
- [11] Gong L, Lewicki R, Griffin R. J, et al. Role of atmospheric ammonia in particulate matter formation in Houston during summertime[J]. Atmospheric Environment,2013,77(3):893-900.
- [12] 巨晓棠,谷保静,蔡祖聪. 关于减少农业氨排放以缓解灰霾危害的建议[J]. 科技导报,2017,35(13):11-12.
- [13] 何萍,金继运, Mirasol F. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18 (2):499-505.
- [14] Gericke D, Pacholski A, Kage H. Measurement of ammonia emissions in multi-plot field experiments[J]. Biosystems Engineering,2011,108(2):164-173.
- [15] 张颖,刘学军,张福锁,等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. 生态学报,2006,26(6):1633-1699.
- [16] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [17] 张玉铭. 华北太行山前平原冬小麦—夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
- [18] 蒋朝晖,曾清如,方至,等. 不同温度下施入尿素后土壤短期内 pH 的变化和氨气释放特性[J]. 土壤通报,2004,35(3):299-302.
- [19] 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.
- [20] 张玉铭,胡春盛,董文旭. 华北太行山前平原农田氨挥发损失[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):417-419.
- [21] 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.
- [22] 张胜, 张翠云, 孙振华. 河北平原山前地区土壤氮挥发测定试验研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(6): 527-529.
- [23] 董文旭, 吴电明, 胡春生, 等. 华北山前平原农田氮挥发速率与调控研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1115-1121.
- [24] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氮挥发及氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 571-579.
- [25] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定: 通气法[J]. 营养与肥料学报 2002, 8(2): 205-209.
- [26] 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氮挥发[J]. 中国环境科学, 2007, 27(3): 409-413.
- [27] 刘学军, 巨晓棠, 潘家荣. 冬小麦—夏玉米轮作中的氮素平衡与损失途径[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 228-237.
- [28] 许能祥, 董臣飞, 丁成龙, 等. 盐土和非盐土施氮对多花黑麦草增产改质效果差异的比较[J]. 草业学报, 2016, 25(11): 115-123.
- [29] 丁成龙, 顾洪如, 许能祥, 等. 不同刈割期对多花黑麦草饲草产量及品质的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 186-194.
- [30] 宋桂云, 杨恒山, 徐寿军, 等. 氮肥运筹对科尔沁地区粮饲兼用玉米金山 10 产量、干物质及氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 289-296.
- [31] 王大鹏, 吴文良, 顾松东, 等. 华北高产粮区基于种植制度调整和水氮优化的节水效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 1-8.
- [32] 杨晓琳. 华北平原不同轮作模式节水减排效果研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [33] 石鹏飞, 郑媛媛, 赵平, 等. 华北平原种养一体规模化农场氮素流动特征及利用效率: 以河北津龙循环农业园区为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1281-1288.
- [34] Øystein H, Hjøllø B A, Eliassen A. Transport distance of ammonia and ammonium in northern europe; 1. Model description[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(D9): 18735-18748.
- (上接第 275 页)
- [25] 张佳蕾, 郭峰, 孟静静, 等. 酸性土施用钙肥对花生产量和品质及相关代谢酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(11): 1101-1109.
- [26] 孟静静, 孙克香, 张佳蕾, 等. 钙肥对酸性土壤春花生生长及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(5): 113-118.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 蒋延惠, 占新华, 徐阳春, 等. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 971-976.
- [29] 熊汉琴, 王朝辉, 宰松梅. 保护地土壤质量障碍因素研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 136-140.
- [30] 范庆峰, 张玉龙, 陈重. 保护地蔬菜栽培对土壤盐分积累及 pH 值的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 103-105.
- [31] 余海英, 李延轩, 周健民. 典型设施栽培土壤盐分变化规律及潜在的环境效应研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 571-576.
- [32] 邱栋梁, 刘星辉, 郭素枝. 模拟酸雨胁迫下钙对龙眼黄河功能的调节作用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1072-1079.
- [33] 张大庚, 祝艳青, 李天来, 等. 长期定位施肥对保护地土壤钙素形态分布的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 198-202.
- [34] 蒋春姬, 王宁, 王晓光, 等. 钙钼硼肥对花生生长发育及产量品质的影响[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(4): 524-531.