

冬小麦冠层-大气氨交换的季节性特征及其影响因素

王 吕¹,景建元²,李惠通¹,郑天义³,李 嘉¹,
吕慎强¹,周春菊³,王林权¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
3. 西北农林科技大学生命科学学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探究冠层氨交换对麦田氨挥发的贡献,从农学和生理角度揭示冠层氨挥发的机理,本文以冬小麦‘小偃 22’和‘郑麦 366’为材料,研究了不同生育期冬小麦冠层 NH₃ 交换动态;枯、黄叶和根茬对冠层 NH₃ 挥发的影响;监测了不同生育期的叶片硝酸盐含量、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶活性、质外体铵浓度及可溶性蛋白含量等氮代谢指标,考察了其与冠层氨交换的关系。结果表明:冬小麦孕穗~扬花之前冠层吸收氨,为氨汇,其对农田氨挥发的消减率可达 23%~40%;孕穗~扬花之后以冠层释放氨,为氨源,其对农田氨挥发的贡献率达 17%~27%。小偃 22 冠层氨的吸收与挥发分别较郑麦 366 高 28%~47%和 19%~68%。氮肥施用下的土壤和冠层氨交换比不施氮处理高 2.82~3.19 kg·hm⁻²和 0.972~1.463 kg·hm⁻²,高肥力土壤和冠层氨交换比低肥力土壤高 15.18~15.55 kg·hm⁻²和 0.947~1.438 kg·hm⁻²。枯、黄叶对冠层氨挥发的作用受品种、生育期及土壤肥力等的影响。在高肥力和施氮(N180)条件下,收获后的麦茬也是氨释放源。冠层氨挥发与土壤温度、质外体铵浓度和可溶性蛋白呈显著线性正相关,与谷氨酰胺合成酶活性和硝酸盐含量呈显著线性负相关。结论:冬小麦营养生长期冠层与大气的氨交换以吸收为主,进入灌浆期后,以释放为主,氨交换方向受到生育期及氮素代谢过程的影响,同时也受到小麦品种和土壤肥力的影响。

关键词:冠层氨交换;硝酸盐含量;谷氨酰胺合成酶;质外体 NH₄⁺;可溶性蛋白
中图分类号:S181.3 **文献标志码:**A

Seasonal characteristics of canopy-atmosphere ammonia exchange and its influencing factors in a winter wheat field

WANG Lv¹, JING Jianyuan², LI Huitong¹, ZHENG Tianyi³, LI Jia¹,
LV Shenqiang¹, ZHOU Chunju³, WANG Linquan¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
3. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: This study aimed to further explore the contribution of canopy ammonia exchange to ammonia volatilization in wheat field, and to reveal the mechanism of canopy ammonia emission in agronomic and physiological perspectives. In this paper, winter wheat ‘Xiaoyan 22’ and ‘Zhengmai 366’ were used as test materials to exam the effects of NH₃ exchange on NH₃ volatilization in wheat field at growing seasons, the effects of dry and yellow leaves on NH₃ emission, and the relationships between NH₃ volatilization and nitrogen metabolism indicators including nitrate reductase, glutamine synthetase activity, apoplast NH₄⁺ and soluble protein content etc in leaves. The results showed that the NH₃ was absorbed by the shoots before booting-flowering, which reduced ammonia volatiliza-

tion in wheat field by 23%~40% while NH_3 emission was from the shoots after the booting-flowering, which contributed to total field ammonia volatilization 17%~27%. The absorption and emission of canopy ammonia in Xiaoyan 22 were 28%~47% and 19%~68% higher than those of Zhengmai 366. Soil and canopy ammonia exchange under nitrogen application were 2.82~3.19 and 0.972~1.463 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher than that under no-nitrogen treatment. Soil and canopy ammonia exchange of fertile soil were 15.18~15.55 and 0.947~1.438 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ higher than that of infertile soil. The effects of dry and yellow leaves on the canopy NH_3 emission were affected by variety, growth period, and soil fertility. Under fertile soil and nitrogen application (N180), wheat stubble was also sources of ammonia release after post-harvest. The canopy NH_3 emission had a significantly positive linear relationship with soil temperature, apoplast NH_4^+ concentration, and soluble protein, and a negative linear relationship with glutamine synthetase activity and nitrate content significantly. It is concluded that the canopy absorbed ammonia from the atmosphere in the vegetative growth period of winter wheat, then it emitted ammonia during the reproduce stage, especially at late filling stage and maturity. The direction of ammonia exchange was affected by the growth period and nitrogen metabolism process, and also by wheat varieties and soil fertility.

Keywords: canopy ammonia exchange; nitrate; glutamine synthetase; apoplast NH_4^+ ; soluble protein

农业生产活动是大气氨(NH_3)的主要排放源,其中施肥引起的 NH_3 排放可达 40%^[1]。大气中的 NH_3 可与空气中的 NO_x 、 SO_2 等发生反应生成 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要成分^[2],诱发灰霾;日益增加的大气氮沉降,威胁着陆地和水体生态系统^[3-5]。农田 NH_3 排放已经从一个农业肥料效应问题转化成了一个生态环境问题。关于土壤和作物生育后期冠层 NH_3 挥发对农田 NH_3 排放的贡献已有大量的研究报道^[6-8],但作物整个生育期冠层-大气氨交换对农田 NH_3 挥发的贡献还缺乏系统研究。有报道指出^[9]:高氮处理($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)的冬小麦灌浆前存在冠层吸收 NH_3 的现象,灌浆后存在 NH_3 的释放,两者占同时期土壤 NH_3 挥发的 0.1%~9.7%和 65.1%~74.5%。从整个生育期看,冬小麦和水稻冠层具有消减农田氨挥发作用^[10]。也有学者认为作物冠层可以吸收外界大气^[11]和土壤^[12]中挥发的 NH_3 ,但作物冠层吸收环境中的 NH_3 在提高氮肥利用率的同时,也可能产生氨毒害作用。因此要正视作物冠层 NH_3 交换规律、冠层 NH_3 交换对农田氨挥发贡献的时空变化规律以及季节性氨排放系数的效应。

冠层对 NH_3 吸收与释放过程受多种因素共同调控,其交换方向取决于作物生育期及其体内的氮素代谢活动。作物生育后期冠层释放 NH_3 与谷氨酰胺合成酶及质外体铵(NH_4^+)及质外体 pH 有密切关系^[7,9,13]。有报道认为生育后期的枯枝落叶中氮素转运对冠层氨挥发有重要影响^[14],但植物体内氮代谢是一个复杂的过程,同时也受品种及生育期等的影响,研究不同作物品种及其全生育期的冠层 NH_3 释放规律与交换机制,对于准确评估农田氨挥发潜力及其季节性分布规律具有重要的理论与实践意

义。因此,本文研究了品种和施氮、枯叶黄叶和根茬等对冠层 NH_3 交换的影响,考察叶片硝酸盐含量、硝酸还原酶活性、谷氨酰胺合成酶活性、质外体 NH_4^+ 和可溶性蛋白等与冠层氨释放的关系,试图探究冬小麦田冠层 NH_3 释放的动态变化与内在机制,及其对麦田氨挥发的调节效应,为农田氨挥发调控与消减提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西北农林科技大学农作一站(2016—2017)和曹新庄试验农场(2017—2018)进行,试验区属半湿润易旱区,耕层土壤理化性质如下表1。供试材料选用小偃22(XY22)和郑麦366(ZM366),播种量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。供试肥料为尿素(含N 46%),试验设置不施氮和施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个氮肥水平。试验共4个处理,分别为小偃22不施氮(XY22-N0),小偃22施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (XY22-N180),郑麦366不施氮(ZM366-N0),郑麦366施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (ZM366-N180),每个处理重复3次。返青期加设去除枯叶黄叶处理(代号N0-Q和N180-Q)。小区面积为 $6 \text{ m} \times 2.6 \text{ m} = 15.6 \text{ m}^2$ 。播种前将2/3尿素和磷肥(重过磷酸钙,含 P_2O_5 46%, $90 \text{ kg} \text{ P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$)均匀撒施到地表,翻耕混匀,平整地面。各小区按25 cm行距开沟播种。播种当天即安放 NH_3 挥发收集装置。将剩余1/3的尿素于拔节期雨前沟施追肥。

1.2 采样与测定

1.2.1 氨气的采集与测定 采用通气式氨挥发收集装置^[9]收集氨气,比色法测定收集液中氨。装置

表 1 耕层土壤(0~20 cm)理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of topsoil (0~20 cm)

生长季	有机质	全氮	矿质氮	速效磷	速效钾	pH(H ₂ O)
Growth stage	OM/(g·kg ⁻¹)	Total N/(g·kg ⁻¹)	Mineral N/(mg·kg ⁻¹)	Avail. P/(mg·kg ⁻¹)	Avail. K/(mg·kg ⁻¹)	(1:2.5)
2016~2017	13.16	0.89	6.82	7.36	136.58	8.30
2017~2018	13.38	0.91	13.28	6.21	124.55	8.03

由高 20 cm 内径 15 cm 的有机玻璃管(每节)、厚 5 mm 直径 25 cm 的有机玻璃挡雨板和 3 个吸盘组成,内置厚 5 cm 直径 15 cm 的两层海绵,其中下层吸收土壤和冠层 NH₃挥发,上层吸收环境中的 NH₃。采样前,海绵用 0.8 mol·L⁻¹ H₃PO₄ 和 0.7 mol·L⁻¹ 甘油混合液浸泡。各小区均安放 3 套装置:播种行、播种行间和去除枯枝黄叶播种行。遮罩冬小麦的装置,下层海绵离冬小麦 5 cm,用来吸收土壤和冠层的 NH₃挥发,冬小麦植株选取长势一致的 3~5 株;不遮罩冬小麦的装置(以 N0-CK 和 N180-CK 表示),高度与遮罩植物处理一致,用来吸收土壤的 NH₃挥发。冠层 NH₃挥发的测定于出苗后开始,施肥后 20 天,每隔 2~3 天测定一次,20 天以后每隔 1 周测定一次,直到小麦全部收获。冬季土壤上冻后停止测定,来年开春土壤解冻后继续测定。海绵中的 NH₄⁺-N 用 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 浸提,靛酚蓝比色法测定。

去除枯叶黄叶处理:即返青之后把冬小麦叶片有黄叶的部分和干枯的叶片剪去。成熟之后刈割小麦留 20 cm 麦茬,对麦茬继续测定 NH₃挥发,持续 15 d。

冬小麦各生育期时间段分别对应为:分蘖期(10 月初~12 月下旬),越冬期(12 月下旬~翌年 2 月底),返青期(3 月上旬)、拔节期(3 月中、下旬)、孕穗~扬花期(4 月)、灌浆期(5 月)、成熟期(6 期上、中旬)。

参考文献^[9]不同高度下层海绵的 NH₃回收率对吸收的 NH₃进行换算。参考文献^[9]计算土壤 NH₃挥发速率(kg·hm⁻²·d⁻¹)、冠层 NH₃挥发速率(kg·hm⁻²·d⁻¹)、土壤 NH₃挥发累积量、冠层 NH₃挥发累积量、麦田 NH₃挥发累积量。

枯叶黄叶 NH₃挥发累积量(kg·hm⁻²)

$$ALAV = \sum (M_N - M_{(N-Q)}) / (S \times R) \times 10\,000$$

麦茬 NH₃挥发累积量(kg·hm⁻²)

$$AWSAV = \sum (M_{(N-WS)} - M_{(CK-N)}) / (S \times R) \times 10\,000$$

其中, M_N 为不去除枯叶黄叶冠层 NH₃挥发量, $M_{(N-Q)}$ 为去除枯叶黄叶冠层 NH₃挥发量, $M_{(N-WS)}$ 为遮罩麦茬 NH₃挥发量, $M_{(CK-N)}$ 为不遮罩植物 NH₃挥发量, S 为收集装置的横截面积, R 为不同海绵高度氨捕获装置的氨气回收率。 $ALAV$ 为正值说明枯叶黄叶参与了冠层氨挥发,负值表示枯叶黄叶没有参与冠层氨挥发过程。

1.2.2 叶片氮素代谢指标的测定 叶片硝酸还原酶活性参照文献^[15]的方法进行;叶片硝态氮含量参照文献^[16]的方法进行;叶片可溶性蛋白采用考马斯亮蓝比色法^[17];叶片谷氨酰胺合成酶活性参照文献^[18]的方法进行,叶片质体外 NH₄⁺采用文献^[19]的方法进行。

1.3 数据处理

数据应用 Excel 2010 程序和 SAS 8.1 统计分析软件进行处理,使用双因素完全随机区组设计方差分析和最小显著性差异法(LSD)对数据均值进行多重比较,回归分析前将有关数据参考文献^[20]做标准化处理,Origin2015 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 冠层 NH₃挥发动态

2016—2017 年和 2017—2018 年冬小麦生长季,基肥和追肥后 15 d 内均出现土壤 NH₃挥发速率峰值,与峰值对应的冠层 NH₃挥发速率为负值,说明有冠层 NH₃吸收现象,追肥后(拔节期)土壤 NH₃挥发和冠层 NH₃吸收比基肥(分蘖期)更为明显。2016—2017 年生长季越冬期,两品种的土壤 NH₃挥发速率小,无明显冠层 NH₃吸收现象;2017—2018 年生长季越冬期土壤 NH₃挥发速率明显,冠层 NH₃挥发速率为负值,冠层有 NH₃吸收。返青期各处理土壤 NH₃挥发速率也有一个峰值,相应的冠层 NH₃挥发速率为负值,说明返青期也有冠层氨吸收,小偃 22 冠层 NH₃吸收较郑麦 366 明显。孕穗~扬花期,施肥处理冠层 NH₃挥发速率为负值,有 NH₃吸收。到灌浆~成熟期,土壤 NH₃挥发下降并维持相对稳定,冠层 NH₃挥发速率以正值为主,表现出明显的冠层 NH₃释放,且 2017—2018 年生长季的土壤 NH₃挥发速率与冠层氨交换均显著高于 2016—2017 年生长季。

2.2 冠层氨释放对麦田氨挥发的贡献及其品种与施肥效应

2016—2017 年生长季,品种和氮肥均对冠层和麦田 NH₃挥发累积量有显著影响($P<0.1$)。小偃 22 全生育期以 NH₃吸收为主,郑麦 366 为 NH₃释放,两品种差异显著($P<0.1$)(表 2)。氮肥处理麦田 NH₃挥发累积量较不施氮高 1.840 kg·hm⁻²,达差异显著水平($P<0.1$)。

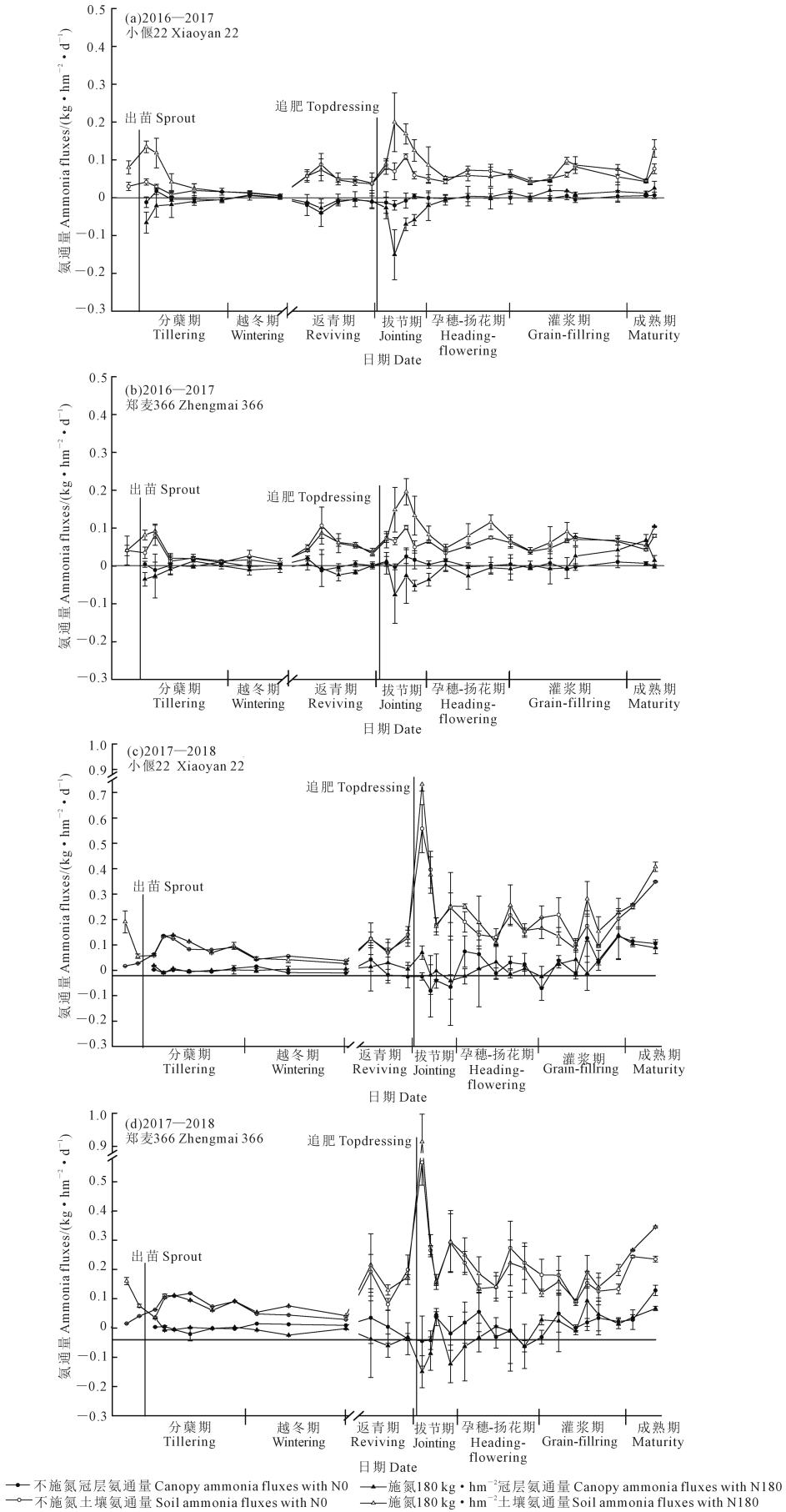


图1 2016—2017年和2017—2018年生长期NH₃通量变化特征

Fig.1 Dynamics of ammonia fluxes of growing seasons of 2016–2017 and 2017–2018

由表 3 可得,2017—2018 年生长季,品种显著影响冠层 NH₃挥发累积量($P<0.1$),小偃 22 冠层为 NH₃释放,郑麦 366 为吸收。施氮对麦田氨挥发也有显著影响($P<0.1$)。

2016—2017 年生长季,在分蘖期和拔节期,施氮处理冠层 NH₃吸收累积量为 0.216~1.130 kg·hm⁻²,可消减 17%~120%麦田 NH₃挥发,郑麦 366 冠层 NH₃吸收量较小偃 22 低 70.1%和 37%。返青期施氮处理的冠层可消减 17%~32%麦田 NH₃挥发,且郑麦 366 吸收量比小偃 22 低 32%。孕穗~扬花期,除郑麦 366 不施氮处理外,其它处理均表现为冠层 NH₃的吸收,其中郑麦 366 施氮处理冠层 NH₃的吸收量为麦田 NH₃挥发量的 22%。在灌浆期和成熟期,施氮处理冠层 NH₃挥发累积量为 0.262~0.820 kg·hm⁻²,对麦田的氨挥发的贡献为 14%~41%;不施氮为 0.015~0.096 kg·hm⁻²,贡献为 4%~9%。

2017—2018 年生长季,分蘖和拔节期,施氮处理冠层 NH₃吸收累积量为 0.144~1.306 kg·hm⁻²,消减 1%~12%麦田 NH₃挥发。越冬期,小偃 22 不施氮处理冠层 NH₃吸收量达麦田 NH₃挥发量 27%,郑麦 366 施氮处理为 23%。返青期和孕穗~扬花期,郑麦 366 施氮处理冠层 NH₃吸收占麦田 NH₃挥发的比例为 36%。在灌浆和成熟期,各处理均表现

为冠层 NH₃的释放,施氮处理冠层 NH₃挥发累积量为 0.317~1.204 kg·hm⁻²,不施氮处理为 0.526~1.615 kg·hm⁻²;施氮处理和不施氮处理的冠层 NH₃挥发对麦田氨挥发的贡献分别为 7%~24%和 16%~28%。

综合两个冬小麦生长季,小偃 22 和郑麦 366 分蘖期和拔节期冠层 NH₃吸收量对麦田 NH₃挥发的削减作用可达 23%~40%。返青期,施氮处理的冠层 NH₃吸收量对麦田 NH₃挥发的削减作用可达 17%~40%。灌浆~成熟期,各处理均为冠层 NH₃的释放,施氮处理冠层 NH₃释放对麦田 NH₃挥发的贡献为 17%~27%。

2.3 枯叶黄叶 NH₃挥发累积量

两个冬小麦生长季在拔节期枯叶黄叶 NH₃挥发累积量均表现一致(见图 2),小偃 22 施肥处理与不施肥处理枯叶黄叶 NH₃挥发累积量均为负值,说明枯叶黄叶不是造成小偃 22 冠层 NH₃挥发的原因;而郑麦 366 均为正值,说明郑麦 366 枯叶黄叶参与了冠层 NH₃挥发。孕穗~扬花期,2016—2017 年生长季各处理枯叶黄叶 NH₃挥发累积量均为正值,但累积量很少;而 2017—2018 年生长季,各处理 NH₃挥发累积量均为负值,说明枯叶黄叶未参与冠层 NH₃挥发。灌浆期,两个冬小麦生长季表现出相反的特征,2016—2017 年生长季,各处理枯叶黄叶 NH₃挥发

表 2 品种和氮肥对 2016—2017 年生长季冠层及麦田 NH₃挥发累积量的影响/(kg·hm⁻²)

Table 2 Effects of variety and nitrogen treatments on accumulative ammonia volatilization of canopy and wheat of 2016–2017 seasons								
处理 Treatment		冠层 ACAV	麦田 AWAV	因素 Factor	冠层 Canopy		麦田 Wheat field	
					F	P	F	P
品种	XY22	-0.990a	8.438a	品种 Variety	9.13	0.0943	24.00	0.0392
Variety	ZM366	0.084b	10.278b	氮肥 Nitrogen	6.70	0.0607	12.88	0.0230
施氮量	N0	0.033a	8.438a	品种 Variety	1.31	0.3161	1.49	0.2893
N rate	N180	-0.939b	10.278b	氮肥 Nitrogen				

注:ACAV 为冠层 NH₃挥发累积量;AWAV 为麦田冠层 NH₃挥发累积量;同列数据后不同小写字母表示同类因素的处理间差异显著($P<0.1$)。
Note:ACAV,accumulative canopy ammonia volatilization;AWAV,accumulative wheat field ammonia volatilization;Values followed by different lower-case letters in the same column are significantly different between the treatments at the 0.1 level for the same factor.

表 3 品种和氮肥对 2017—2018 年生长季冠层及麦田 NH₃挥发累积量的影响/(kg·hm⁻²)

Table 3 Effects of variety and nitrogen treatments on accumulative ammonia volatilization of canopy and wheat of 2017–2018 seasons								
处理 Treatment		冠层 ACAV	麦田 AWAV	因素 Factor	冠层 Canopy		麦田 Wheat field	
					F	P	F	P
品种	XY22	2.088a	27.028a	品种 Variety	8.83	0.0971	7.14	0.1161
Variety	ZM366	-0.608b	24.807a	氮肥 Nitrogen	1.70	0.2620	6.31	0.0660
施氮量	N0	1.471a	25.055b	品种 Variety	1.09	0.3546	1.59	0.2752
N rate	N180	0.008a	26.780a	氮肥 Nitrogen				

注:ACAV 为冠层 NH₃挥发累积量;AWAV 为麦田冠层 NH₃挥发累积量;同列数据后不同小写字母表示同类因素的处理间差异显著($P<0.1$)。
Note:ACAV,accumulative canopy ammonia volatilization;AWAV,accumulative wheat field ammonia volatilization;Values followed by different lower-case letters in the same column are significantly different between the treatments at the 0.1 level for the same factor.

累积量均为负值,说明枯叶黄叶未参与冠层 NH₃ 挥发;而 2017—2018 年生长期,各处理枯叶黄叶 NH₃ 挥发累积量均为正值,说明枯叶黄叶参与了冠层 NH₃ 挥发。

2.4 收获后麦茬 NH₃ 挥发累积量

2016—2017 年生长季,除小偃 22 不施氮处理,其它处理的麦茬均未发现 NH₃ 挥发;施氮处理土壤 NH₃ 挥发累积量均高于不施氮处理且差异显著($P<0.05$)。2017—2018 年生长季,各种处理的麦茬 NH₃ 挥发量在 0.093~0.535 kg·hm⁻²。施氮处理麦茬 NH₃ 挥发累积量和土壤 NH₃ 挥发累积量均显著高于不施氮处理($P<0.05$)。2017—2018 年生长季土壤 NH₃ 挥发累积量均高于 2016—2017 年生长季(表 4)。

2.5 影响冠层 NH₃ 通量的因素

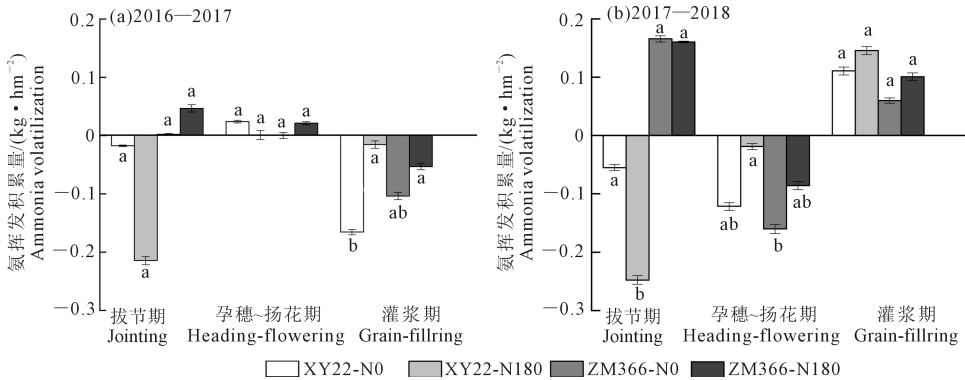
2.5.1 冠层 NH₃ 挥发与耕层土壤温度 冬前,随着耕层土壤温度逐渐降低,小偃 22 和郑麦 366 冠层 NH₃ 挥发速率均有下降趋势(如图 3a);冬后随耕层土壤温度升高,冠层 NH₃ 挥发速率升高,二者呈极显著正线性关系($P<0.01$)(如图 3b)。

2.5.2 质外体 NH₄⁺ 浓度和可溶性蛋白含量变化

返青后,质外体 NH₄⁺ 随生育期呈现升高的趋势,在灌浆期,质外体 NH₄⁺ 均达最高值(如图 4a);花期之前,小偃 22 和郑麦 366 不施氮处理质外体 NH₄⁺ 均高于施氮处理;花期之后,施氮处理高于不施氮处理。可溶性蛋白含量表现出先降低再升高的趋势,在花期达到最大值,小偃 22 不施氮处理和施肥处理可溶性蛋白含量为 31.83 mg·g⁻¹ 和 33.43 mg·g⁻¹,郑麦 366 分别为 31.47 mg·g⁻¹ 和 33.52 mg·g⁻¹,随后有下降趋势。施氮处理高于不施氮处理(如图 4b)。

2.5.3 NH₃ 挥发速率、叶片硝酸盐含量和硝酸还原酶活性 小偃 22 和郑麦 366 冠层 NH₃ 挥发速率与硝酸盐含量呈负线性关系,且小偃 22 关系达显著水平($P<0.05$)(图 5a)。小偃 22 和郑麦 366 冠层 NH₃ 挥发速率与硝酸还原酶活性无显著相关性(图 5b)。

2.5.4 冠层 NH₃ 通量与叶片谷氨酰胺合成酶活性、质外体 NH₄⁺ 浓度和可溶性蛋白含量 小偃 22 和郑麦 366 冠层 NH₃ 挥发速率均与谷氨酰胺合成酶活性呈极显著负线性关系($P<0.01$)(图 6a);与质外体 NH₄⁺ 显著正相关($P<0.05$)(图 6b);与可溶性蛋白含量呈正线性关系,小偃 22 达显著水平($P<0.05$)(图 7)。



注:N0 代表不施氮遮罩植株处理 NH₃ 挥发与遮罩去除枯叶黄叶植株处理 NH₃ 挥发的差值之和,N180 代表施氮 180 kg·hm⁻² 遮罩植株处理 NH₃ 挥发与遮罩去除枯叶黄叶植株处理 NH₃ 挥发的差值之和。同一生育时期不同小写字母表示同类因素的处理间差异显著者 ($P<0.05$)。

Note: N0, the sum of the difference between NH₃ volatilization in the treatment of NH₃ volatilization and the removal of NH₃ volatilization from the dry and yellow leaf plants without nitrogen treatment; N180, the sum of the difference between NH₃ volatilization in the treatment of NH₃ volatilization and the removal of NH₃ volatilization from the dry and yellow leaf plants with nitrogen application of 180 kg·hm⁻². Values followed by different lowercase letters during same growth period represent significantly difference between the treatments at the 0.05 level for the same factor.

图 2 枯叶落叶 NH₃ 挥发累积量

Fig.2 Ammonia volatilization of dry and yellow leaves

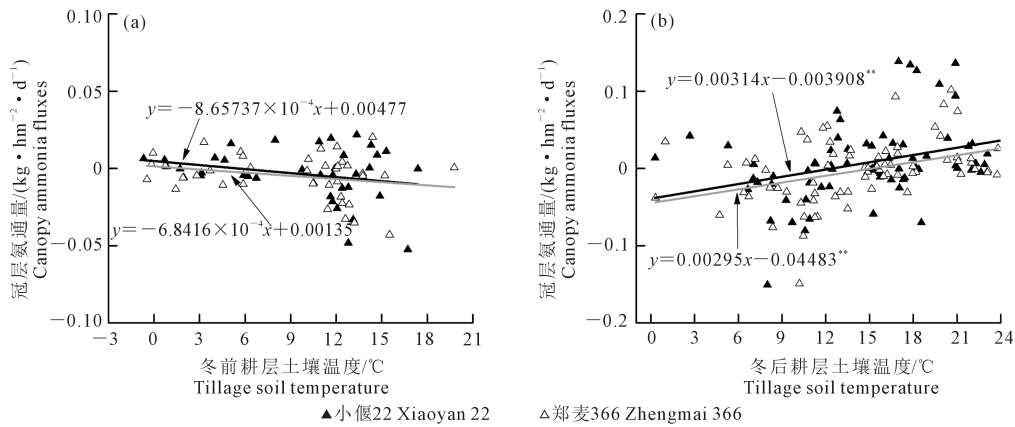
表 4 收获后 15 d 麦茬和土壤 NH₃ 挥发累积量/(kg·hm⁻²)

Table 4 Accumulative ammonia volatilization of wheat stubble and soil in 15 days post-harvest

生长季 Growth stage	处理 Treatment	XY22-N0	XY22-N180	ZM366-N0	ZM366-N180
2016-2017	根茬 AWSAV	0.112±0.138a	-0.164±0.125b	-0.003±0.048ab	-0.189±0.168b
	土壤 ASAV	0.883±0.050b	1.234±0.177a	0.910±0.040b	1.172±0.091a
2017-2018	根茬 AWSAV	0.093±0.104b	0.519±0.123a	0.183±0.033b	0.535±0.186a
	土壤 ASAV	2.297±0.035b	2.513±0.077a	1.926±0.047c	2.369±0.007b

注:表中 AWSAV 为麦茬氨挥发累积量;ASAV 为土壤氨挥发累积量;为平均值±标准差,同行不同小写字母表示处理之间存在显著差异($P<0.05$)。

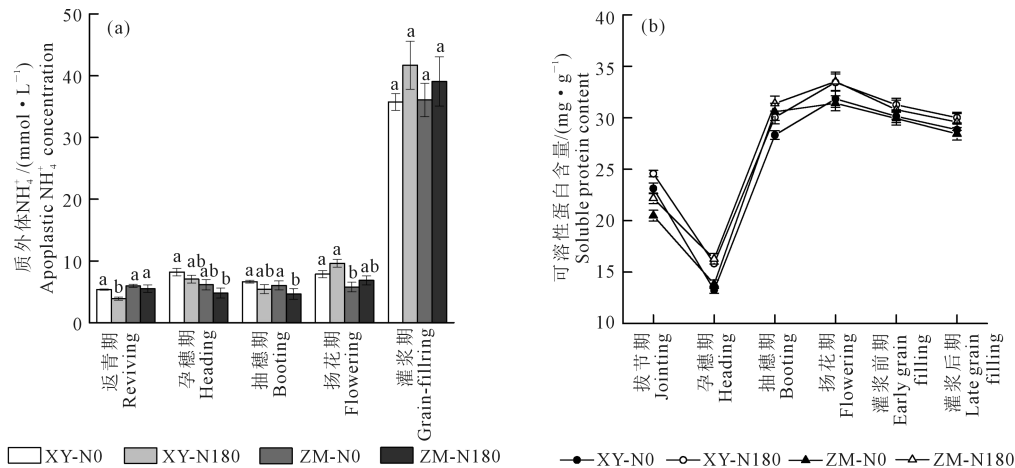
Note: AWSAV, accumulative wheat stubble ammonia volatilization; ASAV, accumulative soil ammonia volatilization;the mean ± standard deviation in the table, the different lowercase letters of the peer indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).



注：*，** 分别表示在 0.05,0.01 水平上差异显著。
Note: *，** indicate significantly difference at 0.05 and 0.01 level, respectively, the same below.

图 3 冠层 NH₃ 通量与耕层土壤温度的关系

Fig.3 Relationship between canopy ammonia fluxes and tillage soil temperature



注：同一生育期不同小写字母表示同类因素的处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Values followed by different lowercase letters during the same growth period indicate significantly difference between the treatments at the 0.05 level for the same factor.

图 4 叶片质外体 NH₄⁺ 浓度、可溶性蛋白含量

Fig.4 Apoplastic NH₄⁺ concentration and soluble protein content of leaves

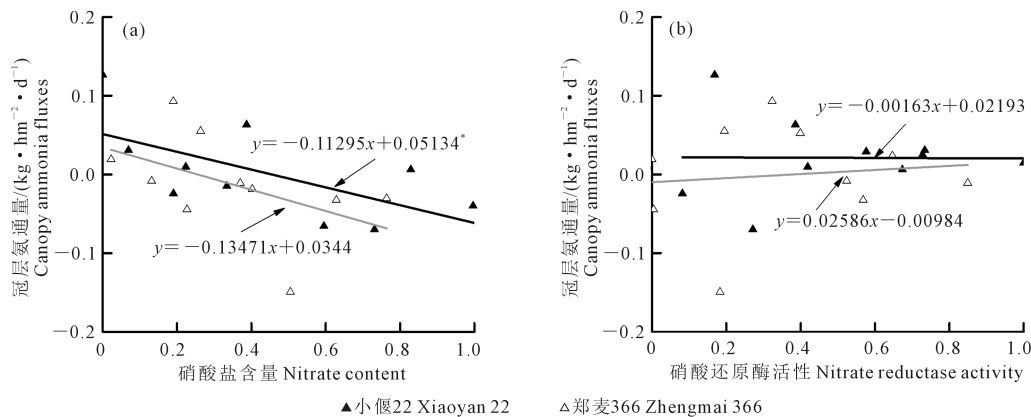


图 5 冠层 NH₃ 通量与硝酸盐含量和硝酸还原酶活性的关系

Fig.5 Relationship between canopy ammonia fluxes and nitrate content with nitrate reductase activity

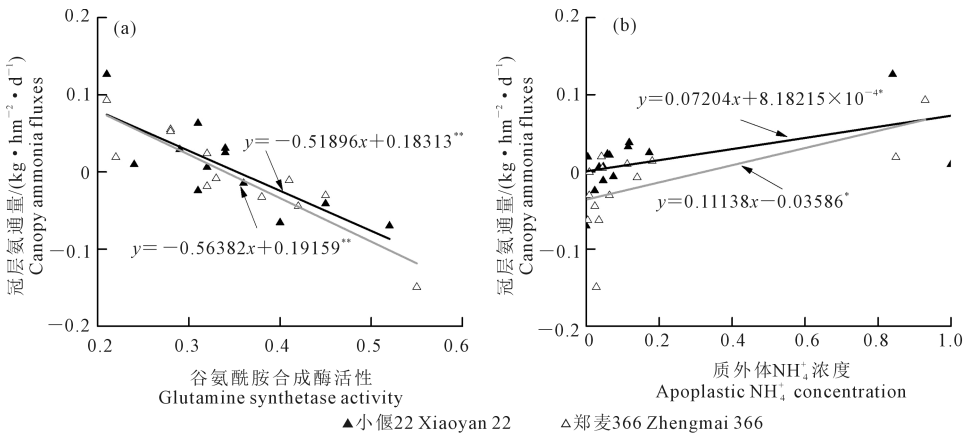


图6 冠层 NH₃ 通量与谷氨酰胺合成酶活性和质外体 NH₄⁺ 浓度的关系

Fig.6 Relationship between canopy ammonia fluxes and glutamine synthetase activity with apoplastic NH₄⁺ concentration

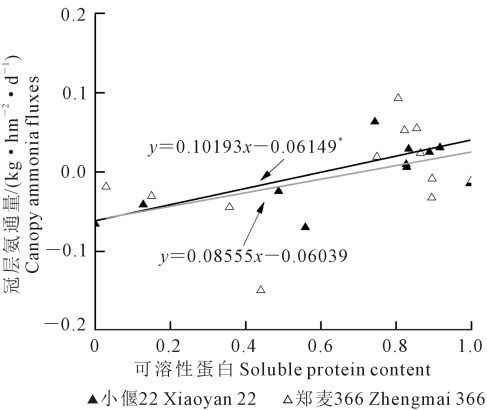


图7 冠层 NH₃ 通量与可溶性蛋白含量的关系

Fig.7 Relationship between canopy ammonia fluxes and soluble protein content

3 讨论

3.1 冠层 NH₃ 交换的季节性分布

冬小麦冠层 NH₃ 交换在不同生育期表现出不同的规律,分蘖期(10—11月)、返青(2—3月初)和拔节期(3月中下旬)冠层是氨汇,冠层 NH₃ 吸收对减少麦田 NH₃ 挥发的贡献为 23%~40%。这与人研究^[21]关于冠层可直接吸收大气中的 NH₃,与农田接壤的森林也会吸收农田释放的 NH₃^[22] 结论一致。在越冬期(12月~翌年2月上中旬),土壤和冠层 NH₃ 挥发较少。因此,营养生长期小麦会主动吸收空气中的 NH₃^[23]。孕穗~扬花期(4月)施氮处理均为冠层 NH₃ 的吸收,但吸收量较少。到灌浆~成熟期(5月),土壤 NH₃ 挥发下降且维持在一定低水平,冠层为 NH₃ 挥发。这与生育后期冠层 NH₃ 挥发特性的报道一致^[9,24]。籽粒收获后 2 周(6月初),麦茬也存在 NH₃ 释放,籽粒收获后 15 d 内麦茬可累计释放的 NH₃ 为 0.093~0.535 kg · hm⁻²。特别是在

高肥力和施用氮肥条件下较显著。因此收获后土壤和根茬的氨挥发不容忽视。

3.2 枯叶黄叶 NH₃ 挥发

枯、黄叶对冠层 NH₃ 挥发的影响受冬小麦品种、生育时期和土壤肥力等的影响。在拔节期郑麦 366 枯枝落叶参与冠层 NH₃ 挥发,而小偃 22 则无,这可能与小麦品种间的生长发育进程及氮代谢的差异有关,如小偃 22 植株比郑麦 366 高 10 cm,比郑麦 366 早熟 3~7 d,叶片为细长型,而郑麦 366 为宽厚型。在孕穗~扬花期,小偃 22 和郑麦 366 枯枝落叶均未参与冠层 NH₃ 挥发,可能是此生育期营养生长和生殖生长对氮代谢需求旺盛,老叶氮素向穗器官转运速度较快。灌浆期,小偃 22 和郑麦 366 在 2017—2018 年生长季,枯叶黄叶参与了冠层 NH₃ 挥发,而 2016—2017 年生长季没有,原因可能与土壤肥力和植株氮素营养水平有关。2017—2018 年生长季,播前土壤矿质氮含量几乎为 2016—2017 年生长季的 2 倍,根系吸收的氮素对籽粒的贡献较大,而叶片氮素向籽粒的转运下降,使得这部分养分来不及转运至籽粒而造成冠层 NH₃ 挥发的增加。2016—2017 年灌浆期小偃 22 和郑麦 366 施氮处理叶片氮素累积量分别为 2.36 mg · 茎⁻¹ 和 0.90 mg · 茎⁻¹,不施氮处理分别为 0.49 mg · 茎⁻¹ 和 0.34 mg · 茎⁻¹,2017—2018 年生长季小偃 22 和郑麦 366 施氮处理叶片氮素累积量为 5.34 mg · 茎⁻¹ 和 2.97 mg · 茎⁻¹,不施氮处理为 4.15 mg · 茎⁻¹ 和 2.50 mg · 茎⁻¹(未发表)。有研究指出冬小麦器官脱落物中的氮含量仅占作物生长后期减少总量的 4% 左右^[25],还有学者利用同位素¹⁵N 观测植物根系和根系周围的土壤并没有发现冠层氮素迁移分泌的踪迹^[26]。因此,枯黄叶对冠层氨挥发的贡献有限。

3.3 冠层 NH₃挥发的农学因素

NH₃挥发与土壤温度密切相关^[27]。冬前(10—12月)随着气温的降低,冠层活动减弱,因此温度与冠层氨挥发的关系不密切。冬后(3—6月)随着温度升高,土壤氮素转化和作物冠层活动趋于旺盛,耕层土壤温度与冠层 NH₃挥发极显著正相关(图3),冠层 NH₃的吸收和释放随施氮量的增加而增加,施氮处理冠层 NH₃吸收是不施氮处理的 5.3~10.3 倍,冠层 NH₃释放为 0~8.5 倍(2016—2017 年生长季)。冠层 NH₃的吸收和释放也受土壤肥力的影响,小麦一生中 1/3 氮素吸收来源于肥料氮,2/3 来源于土壤氮^[28]。高肥力有利于土壤氨挥发及其与冠层氨交换。2017—2018 年生长季,播前土壤矿质氮含量是 2016—2017 年生长季的 2 倍,不施氮处理冠层 NH₃挥发是施氮处理的 1.2~2.1 倍。2016—2017 年生长季,麦茬 NH₃挥发不明显(除小偃 22 施氮处理),而 2017—2018 年生长季,麦茬 NH₃挥发明显,这也与土壤肥力和氮素供应导致麦茬含氮量高有关。2016—2017 年生长季小偃 22 和郑麦 366 施氮麦茬氮素含量分别为 2.88 g·kg⁻¹和 2.05 g·kg⁻¹,不施氮处理为 1.08 g·kg⁻¹和 1.20 g·kg⁻¹,2017—2018 年生长季小偃 22 和郑麦 366 施氮处理麦茬氮素含量分别为 7.62 g·kg⁻¹和 5.25 g·kg⁻¹,不施肥处理分别为 6.09 g·kg⁻¹和 5.14 g·kg⁻¹(未发表)。2017—2018 年生长季,充足的土壤氮素供应使得收获后麦茬含有比较多的氮素,为氨挥发提供了氮源。

3.4 影响冠层 NH₃挥发的生理因素

冠层氨通量与质外体铵浓度密切相关(图 6b),而后者与植株的生育进程和氮素营养状况有关。冬小麦生长季以花期为分界点,花前主要是营养体的氮素储存,以氨的同化为主,花后营养器官中储存的氮素开始向籽粒中转运,且叶片花前氮素转运量较高^[29]。硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶是植株体氮素同化的两个关键酶,进入小麦体内的硝酸盐通过硝酸还原酶还原为 NH₄⁺-N,再通过谷氨酰胺合成酶合成氨基酸和蛋白质等有机氮化合物形态存在植物体内^[30]。笔者推断:在营养生长期,高的硝酸还原酶活性有利于硝酸盐还原,为冠层 NH₃挥发提供氮源;而高的谷氨酰胺合成酶活性促进了氨的转化,减少了冠层氨挥发的氮源。冠层氨挥发与硝酸还原酶活性不相关(图 5b),与谷氨酰胺合成酶活性呈显著正相关(图 6a),因此控制营养生长期植株氨浓度和氨通量的关键步骤是氨的同化过程而非硝酸还原过程。花期之后主要进行氮素的转运及氮的再利用,这时储存在小麦营养器官氮素转化为

可溶性有机氮,如可溶性蛋白质(图 4b),向生理库—籽粒中转移过程中部分氨基酸可能水解释放 NH₃,到灌浆~成熟期,GS 酶活性下降,不能同化这部分 NH₃,使得质外体 NH₄⁺浓度(图 4a)和冠层 NH₃挥发增加(图 1)。在本试验中,抽穗后叶片中可溶性蛋白含量大幅度上升,并始终维持在一个较高的水平;而灌浆末期~成熟期质外体 NH₄⁺浓度迅速升高为冠层 NH₃挥发提供了物质基础。

4 结 论

1)冬小麦冠层 NH₃的吸收和释放因生育期而异,孕穗~扬花期之前以冠层 NH₃吸收为主,对麦田的消减率为 23%~40%;孕穗~扬花期之后以冠层 NH₃释放为主,对麦田的贡献率为 17%~27%。施氮处理和高土壤肥力条件下的冠层 NH₃释放和吸收均较不施肥或低土壤肥力大。

2)冬小麦枯叶黄叶对冠层 NH₃挥发的影响较小,且受生育期、小麦品种及土壤肥力等影响。

3)冠层氨挥发受环境条件影响,与植株氮代谢密切相关。冠层氨释放与冬后土壤温度、质外体铵浓度、可溶性蛋白显著正相关,而谷氨酰胺合成酶活性和叶片硝酸盐含量显著负相关。营养生长期的冠层氨交换受氨同化过程的控制,灌浆末期的冠层氨释放受叶片等器官的氮素转运过程控制。

参 考 文 献:

[1] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. Biogeochemistry, 2004, 70(2):153-226.

[2] Hayashi K, Nishimura S, Yagi K. Ammonia volatilization from a paddy field following applications of urea: Rice plants are both an absorber and an emitter for atmospheric ammonia[J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(2):485-494.

[3] Bergström A K, Jansson M. Atmospheric nitrogen deposition has caused nitrogen enrichment and eutrophication of lakes in the northern hemisphere[J]. 2010, 12(4):635-643.

[4] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions [J]. Science, 2008, 320(5878):889-892.

[5] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. Science, 2004, 303(5665):1876-1879.

[6] Yang Y, Zhou C, Li N, et al. Effects of conservation tillage practices on ammonia emissions from Loess Plateau rainfed winter wheat fields [J]. Atmospheric Environment, 2015, 104:59-68.

[7] 陈刚, 徐阳春, 沈其荣. 施氮水平对水稻生育后期地上部氨挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1483-1488.

[8] 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.