

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020032802

马儒龙, 王章玮, 张晓山. 脲酶抑制剂对冬小麦叶片氨排放潜势的影响[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2047-2053.

MA Rulong, WANG Zhangwei, ZHANG Xiaoshan. Effect of urease inhibitors on the ammonia emission potential of winter wheat[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (7): 2047-2053.

脲酶抑制剂对冬小麦叶片氨排放潜势的影响*

马儒龙^{1,2} 王章玮^{1,2}** 张晓山^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京, 100085; 2. 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘要 为研究脲酶抑制剂对冬小麦气孔氨排放潜势 (Γ_s) 的影响, 田间试验获得单施尿素 (NS) 及尿素+抑制剂 (NS+YZ) 两种施肥处理下冬小麦气孔氨排放潜势 (Γ_s) 和土壤氨排放潜势 (Γ_g) 变化特征, 以及天气晴朗条件下冬小麦叶片与大气间氨气 (NH_3) 交换日间变化. 结果表明, 不同生长期小麦质外体 NH_4^+ 浓度及 Γ_s 值不同, 扬花期及衰老期较高, 灌浆期较低; 对 NH_3 交换日间变化观测发现, 灌浆期小麦通过气孔吸收大气 NH_3 , 吸收通量主要受到气孔导度控制, 最大值及最小值分别出现在上午 10:00 及下午 19:00, 其值分别为: $(0.147 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, $(0.008 \pm 3.444 \cdot 10^{-5}) \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. 试验期间, NS+YZ 处理冬小麦叶片 NH_4^+ 浓度及 Γ_s 值明显高于 NS 处理, 与土壤氨排放潜势 (Γ_g) 比较发现, 脲酶抑制剂在降低土壤氨气排放潜势的同时增加植被氨气排放潜势, 酶抑制剂对农业氨排放的影响应结合土壤与植被系统评估.

关键词 尿素, 脲酶抑制剂, 冬小麦, 氨排放潜势.

Effect of urease inhibitors on the ammonia emission potential of winter wheat

MA Rulong^{1,2} WANG Zhangwei^{1,2}** ZHANG Xiaoshan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China)

Abstract To investigate the influence of urease inhibitors on the stomatal ammonia emission potential (Γ_s) of winter wheat, The characteristic of ammonia emission potential of winter wheat and soil (Γ_g) were collected by field experiment respectively in both urea (NS) and urea with inhibitors (NS+YZ) treatments, and the diurnal variation of ammonia exchange between atmosphere and winter wheat was conducted. The results showed that the ammonium concentration and Γ_s of winter wheat changed with the growth period: the flowering stage and senescence stage were higher, and the filling stage was lower. The observation of the diurnal variation of ammonia exchange showed that the wheat absorbed the atmospheric ammonia through the stomata during the filling period, and the absorption flux was mainly controlled by stomatal conductance, the maximum and minimum values appear at 10:00 a.m. ($(0.147 \pm 0.001) \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) and 19:00 p.m. ($(0.008 \pm 3.444 \cdot 10^{-5}) \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), respectively. NH_4^+ concentration and ammonia emission potential of NS+YZ treatment were significantly higher than that of NS treatment in leaves but lower in soils, indicated that urease

2020年3月28日收稿(Received: March 28, 2020).

* 国家重点研发计划项目(2017YFC0210106)资助.

Supported by National Key R&D Program (2017YFC0210106) of China.

** 通讯联系人 Corresponding author, E-mail: wangzhw@rcees.ac.cn

inhibitor could increase ammonia emission potential of winter wheat but reduce soil ammonia emission potential. Therefore, the effects of urease inhibitors on agricultural ammonia emissions should be systematically evaluated in combination with soil and vegetation.

Keywords urea, urease inhibitor, winter wheat, the emission potential of NH_3 .

NH_3 是大气中主要的碱性气体, 进入大气后与酸性气体(SO_2 、 NO_x 等)反应产生二次颗粒物, 是 $\text{PM}_{2.5}$ 形成的重要原因^[1]. 大气中氨气通过干湿沉降进入水体后, 使水体氮素增加, 导致水体富营养化; 进入土壤后, 在土壤微生物作用下转化为硝态氮, 导致土壤酸化^[2-3]. 大量氨气进入生态系统, 会改变生态系统中物种竞争格局, 降低物种的多样性^[4].

直接通量测量发现植被冠层是 NH_3 的排放源^[5-7]. 冠层与大气的氨交换主要由叶表氨交换、叶片气孔氨交换及土壤氨气双向交换组成. 叶-大气 NH_3 交换的过程通常为双向交换, 交换平衡时 NH_3 浓度称为气孔 NH_3 补偿点(χ_s)^[8]. 当大气 NH_3 浓度高于 χ_s 时, 植被吸收 NH_3 , 反之亦然^[9-11]. χ_s 估算较为困难, 常用叶片质外体中 NH_4^+ 浓度与 H^+ 浓度的比值来代替 χ_s 评估植被 NH_3 排放的可能性, 该比值称为氨排放潜势(Γ)^[12]. Γ 一个无量纲的指标, 受植被类型、植物生长发育期、谷氨酰胺合成酶(GS)活性等因素影响^[12-13]. 土壤含氮量直接影响植被 NH_4^+ 吸收量, 因此施肥对 Γ 值影响较大^[13-14], 不同氮素种类也会通过影响质外体 pH 值改变 Γ 值的大小^[15].

尿素是我国主要的氮肥品种, 施肥后导致大量 NH_3 挥发. 添加脲酶抑制剂作为一种有效抑制尿素氨挥发的措施被广泛研究^[16-20]. 研究发现, 硝化抑制剂双氰胺(DCD)和脲酶抑制剂氢醌(HQ)混合施用, 可增加肥料作用时间, 提高土壤肥效^[21]. 抑制剂同样能够促进土壤细菌、真菌和放线菌生长^[22], 还能减少氧化亚氮与其他温室气体的排放, 提高肥效^[23-24]. 总之, 脲酶抑制剂能够有效地抑制土壤脲酶活性, 延缓尿素水解, 降低土壤氨挥发. 添加脲酶抑制剂导致植被 N 吸收增加, 改变叶组织中 NH_4^+ 浓度, 影响 Γ 值及氨排放通量. 当前添加脲酶抑制剂评估集中在土壤-大气气体交换通量^[23, 25], 忽略了对植被排放的影响.

本研究对比了单独施加尿素(NS)、尿素添加脲酶抑制剂(NS+YZ)的两种处理小麦氨排放潜势的差异, 综合评估添加脲酶抑制剂后小麦 NH_3 通量变化特征. 这些结论为进一步评估施肥类型对植被氨排放潜势及通量的影响有重要意义.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 试验设计

选取冬小麦(轮选 987)于 2019 年 4 月 19 日(拔节期)至 5 月 29 日(成熟期)在北京林业大学试验基地开展田间试验. 试验共设置 2 个处理, 分为施加尿素+脲酶抑制剂处理(NS+YZ)与单施尿素处理(NS), 每个处理设置 3 个重复. 两种处理下基肥施用均按照传统施肥水平 $150 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ 施用, 为使结果明显, 追肥水平按照 $270 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ 施用, NS+YZ 处理抑制剂与尿素比例为 1 : 100, 施肥日期为 4 月 19 日. 4 月 19 日、4 月 24 日、4 月 27 日、5 月 5 日、5 月 25 日发生了灌溉或降水事件, 记录水量(mm). 选择天气晴朗、风速较低的日期(5 月 9 日)测量地表 1 m 高度处大气氨浓度日间的变化, 同步测量小麦叶片气孔导度与氨补偿点日间变化. 试验期间每天采集小麦叶和土壤样品, 测量 NH_4^+ 浓度及 pH. 供试麦田土壤本底 pH 值为 7.68, 有机质含量为 $21.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总氮含量为 $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 供试肥料为尿素(以 N 计 46%)和脲酶抑制剂(NBPT, 购买于美国巴斯夫公司).

1.2 样品采集与测定

小麦质外体 NH_4^+ 及 pH 值测定: 随机选取小麦个体, 剪取 15 片冠层中部发育良好的小麦叶片立即放置于去离子水中保存, 每种处理 3 个重复. 样品采集后 30 min 内完成分析测定. 于 4 月 29 日、5 月 7 日、5 月 20 日参照 Husted 等^[26] 研究方法进行小麦叶片质外体提取及质外体气体体积(V_{air})、液体体积(V_{apo})的测定, 稀释倍数及对应日期如表 1. 使用 MDH 试剂盒测量质外体 MDH 酶活性, 检测细胞质

污染,未发现质外体中含有 MDH 酶. 使用 ICS-1100(DINOX) 离子色谱测量小麦质外体 NH_4^+ 浓度, STARA2110 微量 pH 计测量小麦质外体 pH 值.

表 1 不同时期质外体气体、液体体积 ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) 及渗透后稀释倍数

Table 1 Volume of gas and liquid of apoplast and Dilution ratio after penetration at different time

日期 Data	4/29(4/20—5/1)	5/7(5/3—5/14)	5/20(5/17—5/29)
V_{air}	0.2653	0.2757	0.2852
V_{apo}	0.0748	0.0914	0.0694
稀释倍数(Dilution ratio)	4.5468	4.0300	5.1100

土壤 NH_4^+ 浓度及 pH 值测定: 采集 0—10 cm 土壤样品-20 °C 冷冻保存, 记录土壤湿度. 测量时计算并称取含 5 g 干土的土壤置于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 氯化钾溶液 ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 塞紧塞子于震荡机震荡 1 h 后离心 ($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 15 min, 使用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤上清液后在 -4 °C 环境中保存. 使用 AA3 连续流动分析仪测量土壤 NH_4^+ 浓度, STARA2110 微量 pH 计测量 pH 值, 每种处理 3 个重复.

麦田大气 NH_3 浓度及气孔导度测量: 于 5 月 9 日 07:00、10:00、13:00、16:00、19:00 按上述方法采集小麦叶片进行小麦质外体 NH_4^+ 及 pH 值测定. 利用便携式温室气体分析仪 (LGR, 美国) 于采样前后半小时连续测量麦田近地面 1 m 处大气氨浓度. 使用 Li-6400 便携式光合仪进行叶片气孔导度测量.

1.3 小麦气孔氨排放潜势 (Γ_s)、气孔氨补偿点 (χ_s) 与通量计算

小麦氨排放潜势计算参照 Husted 等^[26] 方法, 由于质外体渗透离心过程质外体被渗透液稀释, 小麦质外体 NH_4^+ 及 H^+ 实际浓度及小麦气孔氨排放潜势计算如下:

$$[\text{NH}_4^+]_{\text{实}} = [\text{NH}_4^+]_{\text{测}} \cdot \frac{V_{\text{apo}} + V_{\text{air}}}{V_{\text{apo}}} \quad (1)$$

$$[\text{H}^+]_{\text{实}} = [\text{H}^+]_{\text{测}} \cdot \frac{V_{\text{apo}} + V_{\text{air}}}{V_{\text{apo}}} \quad (2)$$

$$\Gamma_s = [\text{NH}_4^+]_{\text{实}} / [\text{H}^+]_{\text{实}} \quad (3)$$

其中, $[\text{NH}_4^+]_{\text{实}}$ 为 NH_4^+ 实际浓度, $[\text{NH}_4^+]_{\text{测}}$ 为 NH_4^+ 测量浓度; $[\text{H}^+]_{\text{实}}$ 为 H^+ 实际浓度, $[\text{H}^+]_{\text{测}}$ 为 H^+ 测量浓度.

土壤氨排放潜势 (Γ_g) 计算如下:

$$\Gamma_g = \frac{[\text{NH}_4^+]_g}{[\text{H}^+]_g} \quad (4)$$

其中, $[\text{NH}_4^+]_g$ 为土壤 NH_4^+ 浓度, $[\text{H}^+]_g$ 为土壤 H^+ 浓度.

小麦气孔氨补偿点计算参照 Massad 等^[12] 方法, 小麦气孔氨补偿点及氨气通量 (F_s) 计算:

$$\chi_s = \frac{161500}{T} \cdot e^{-\frac{10380}{T}} \cdot \Gamma_s \quad (5)$$

$$F_s = \frac{\chi_s - \chi_{sz0}}{R_{s\text{NH}_3}}, \text{其中:} \quad (6)$$

$$R_{s\text{NH}_3} = R_{s\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{D_{\text{H}_2\text{O}}}{D_{\text{NH}_3}} \quad (7)$$

$$D_{\text{NH}_3}(T) = 0.1987 \cdot \left(\frac{T}{273.13} \right)^{1.81} \quad (8)$$

$$D_{\text{H}_2\text{O}}(T) = 0.2178 \cdot \left(\frac{T}{273.13} \right)^{1.81} \quad (9)$$

式中, T 为叶片温度, $R_{s\text{NH}_3}$ 为小麦气孔 NH_3 阻力, $R_{s\text{H}_2\text{O}}$ 为小麦气孔水蒸气阻力, D_{NH_3} 为小麦气孔 NH_3 导度, $D_{\text{H}_2\text{O}}$ 为小麦气孔水蒸气导度, χ_{sz0} 为高度 1 m 处大气 NH_3 浓度.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 两种施肥处理下小麦质外体 NH_4^+ 、pH 值及 Γ_s 变化特征

根据小麦生长期将小麦分为拔节抽穗期(4月19日—5月1日)、扬花期(5月1日—5月12日)、灌浆期(5月12日—5月26日)及成熟期(5月26日—5月29日),不同时期 NS+YZ 及 NS 两种处理下小麦质外体 NH_4^+ 、 H^+ 浓度和 Γ_s 值见图 1. NS+YZ 及 NS 处理下小麦质外体 NH_4^+ 浓度分别为 $(238.72 \pm 98.85) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(224.28 \pm 109.38) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值 \pm 标准差). 施肥后两次降水(4月19日及4月24日)导致质外体 NH_4^+ 浓度出现两次峰值及 pH 值的两次升高;扬花期的降水使得 pH 及 NH_4^+ 浓度同时下降. 这是由于追肥后降水促进了尿素水解,加速了小麦对土壤 NH_4^+ 值的吸收,使得质外体中 NH_4^+ 含量明显升高,同时使质外体产生较高的 pH 值. 此外扬花期时肥料水解完全(图 2(b)),小麦质外体 pH 主要受到土壤湿度影响:降水事件发生前土壤湿度(图 2(a))较低,产生了土壤干旱胁迫,质外体有较高 pH 值,降水后干旱胁迫消失, pH 值明显降低^[27-28]. Γ_s 值主要受 NH_4^+ 浓度及 pH 值的影响,总体来看,追肥后的降水会导致 Γ_s 值明显上升,而扬花期土壤较为干旱时,灌溉及降水会使 Γ_s 值降低.

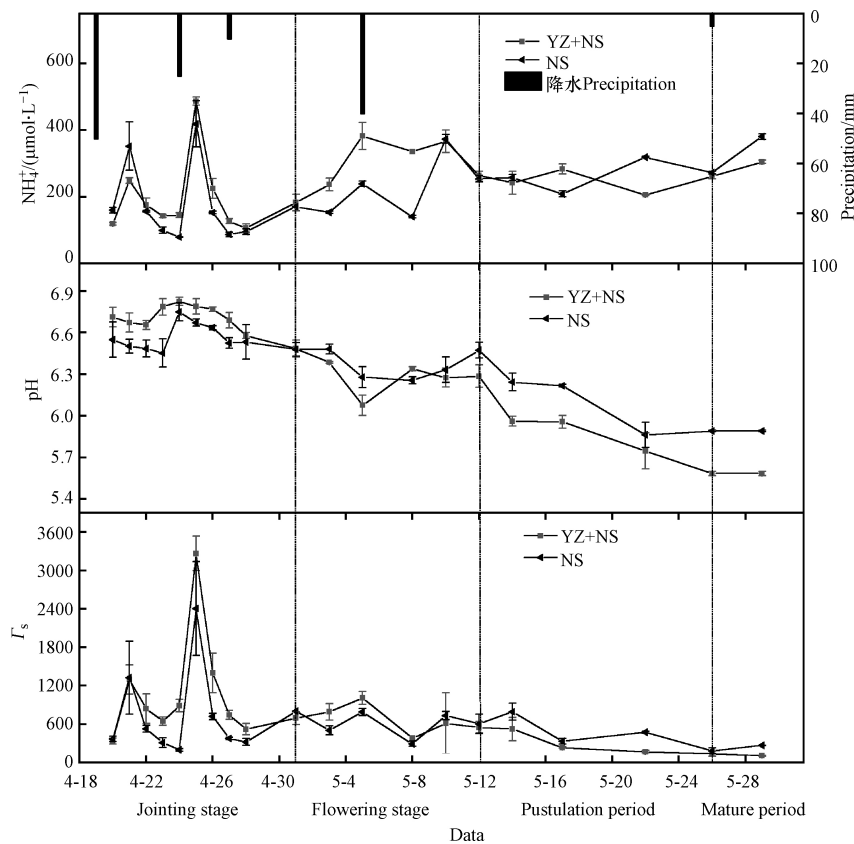


图 1 两种施肥处理下质外体 NH_4^+ 浓度, pH 值和的 NH_3 排放潜势时间变化

Fig.1 The time variation of apoplast NH_4^+ concentration, pH and NH_3 emission potentials in two fertilization treatments

试验期间,两种处理小麦质外体 NH_4^+ 浓度均在施肥后(拔节期)显著升高,至扬花期时再次上升,扬花期后期开始下降后到成熟期开始上升.这是由于拔节期肥料添加供给了小麦生长所需要的养分,小麦大量吸收土壤氮素,导致质外体 NH_4^+ 浓度上升;扬花期后期至灌浆期铵根离子浓度稍有下降,这主要受到小麦体内谷氨酰胺合成酶、光合特征变化影响^[29];小麦成熟后,叶片衰老会伴随蛋白质等有机物质的分解,植物释放大量 NH_3 ^[30].小麦 Γ_s 值在施肥后同样出现两次峰值,但扬花期及成熟期 Γ_s 变化较为平缓.这是由于扬花期及成熟期小麦质外体 pH 值逐渐降低,导致 Γ_s 值并未随 NH_4^+ 浓度上升而上升.这说明在拔节期至扬花期时期内,小麦氨排放潜势的增加主要是由于施肥导致的.

由图 1(a)可看出, NS+YZ 处理中质外体 NH_4^+ 浓度在第一个峰值时小于 NS 处理,随后 NS+YZ 处理 NH_4^+ 浓度整体高于 NS 处理.这是由于施肥后降水时,脲酶抑制剂的添加导致 NS+YZ 处理相较于

NS 处理肥料水解更为缓慢,从而在第一个峰值时 NS 处理土壤 NH_4^+ 浓度(图 2(a))较高,导致小麦质外体 NH_4^+ 浓度较高^[31].快速的水解造成了土壤的大量氨挥发,降低了肥料利用效率,而脲酶抑制剂的添加使尿素水解较为缓慢,其肥效更久,导致 NS+YZ 处理在第一个质外体 NH_4^+ 浓度峰值过后其浓度超过 NS 处理.试验期间 NS+YZ 处理 Γ_g 值明显高于 NS 处理,分别为 769.21 ± 701.57 、 619.48 ± 549.99 .这表明 NS+YZ 处理较高的质外体 NH_4^+ 浓度导致其具有较大 Γ_g 值,小麦气孔氨排放可能性更大.

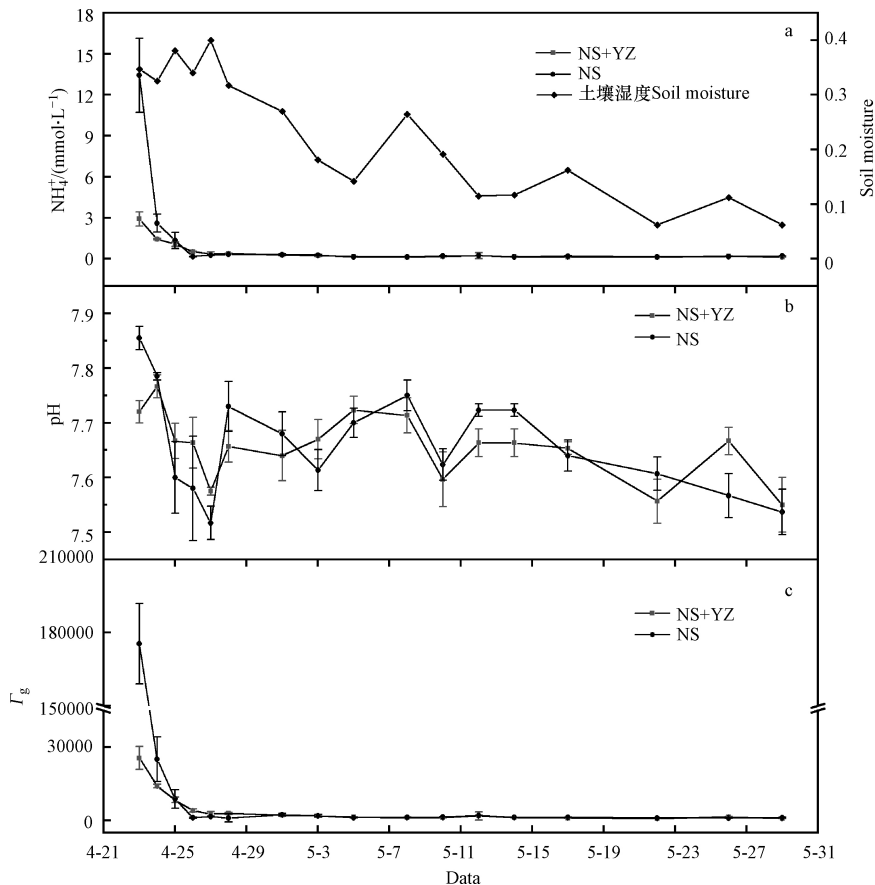


图 2 两种施肥处理下土壤 NH_4^+ 浓度, pH 值和的 NH_3 排放潜势变化规律

Fig.2 The time variation of soil NH_4^+ concentration, pH and NH_3 emission potentials in two fertilization treatments

2.2 不同施肥处理下土壤 NH_4^+ 浓度、pH 值及土壤排放潜势(Γ_g)变化特征

土壤 NH_4^+ 浓度、pH 值及 Γ_g 值变化见图 2. 施肥后土壤 NH_4^+ 浓度迅速达到最高值,随后逐渐降低,一周后趋于稳定,NS+YZ 和 NS 处理土壤 NH_4^+ 浓度分别为 $(0.51 \pm 0.72) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(1.25 \pm 3.29) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值 \pm 标准差).这表明尿素在土壤中两周内水解完全,随后的降水对土壤 NH_4^+ 浓度影响较小.在试验期内土壤 pH 值变化不明显,NS+YZ 处理与 YZ 处理 pH 值分别为: 7.66 ± 0.06 、 7.65 ± 0.09 (平均值 \pm 标准差).与 NH_4^+ 浓度类似,土壤 Γ_g 变化同样呈现逐渐降低的趋势,一周后基本稳定,表明土壤氨气的挥发主要与施肥活动相关,这与 Massad 等^[12]研究结果类似.对比两种处理,施肥后 NS 处理下土壤 NH_4^+ 浓度和 Γ_g 远高于 NS+YZ 处理,说明脲酶抑制剂能够有效抑制尿素水解,降低土壤 NH_4^+ 浓度及 Γ_g ,减少土壤氨挥发.

2.3 扬花期小麦气孔补偿点(χ_s)及排放通量(F_s)变化特征

小麦氨补偿点、气孔导度及排放通量变化特征见图 3. NS+YZ 处理与 NS 处理小麦 χ_s 的变化范围分别为 $(0.056 \pm 0.051) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.080 \pm 0.076) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,均呈现出先增加后降低的趋势,最高值出现在午时 13:00.由图 3 可知,扬花期小麦气孔主要起到吸收 NH_3 的作用.而由图 3(c)可知, χ_s 最高点时气孔 NH_3 吸收量较低,这表明 χ_s 大小主要受到小麦自身生理状况影响:小麦质外体溶液构成了一个较大的 NH_4^+ 动态池,通过与叶肉细胞的 NH_4^+ 交换而使其具有较大的 NH_4^+ 日间变化动态,这与 Husted 等^[32]研究一致.比较两种处理发现在上午 10:00 之前 χ_s 变化基本一致,随后 NS 处理 χ_s 上升趋势较 NS+YZ 处理

明显,说明不同施肥处理可能会影响叶片质外体 NH_4^+ 动态池的转化吸收过程,进而影响 NH_3 排放潜势.

对小麦气孔的 NH_3 交换通量结果的计算见图3(c).结果表明,在日间,气孔吸收通量与气孔导度变化趋势(图3(b))一致,呈现出明显的双峰规律,气孔最大吸收通量出现在上午10:00,NS+YZ处理及NS处理均为: $(0.147\pm 0.001)\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.最小吸收通量出现在下午19:00,NS+YZ处理及NS处理均为 $(0.008\pm 3.440\times 10^{-5})\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.这表明此时气孔-大气 NH_3 交换通量大小主要受到气孔导度控制,与两者浓度梯度关系较小.

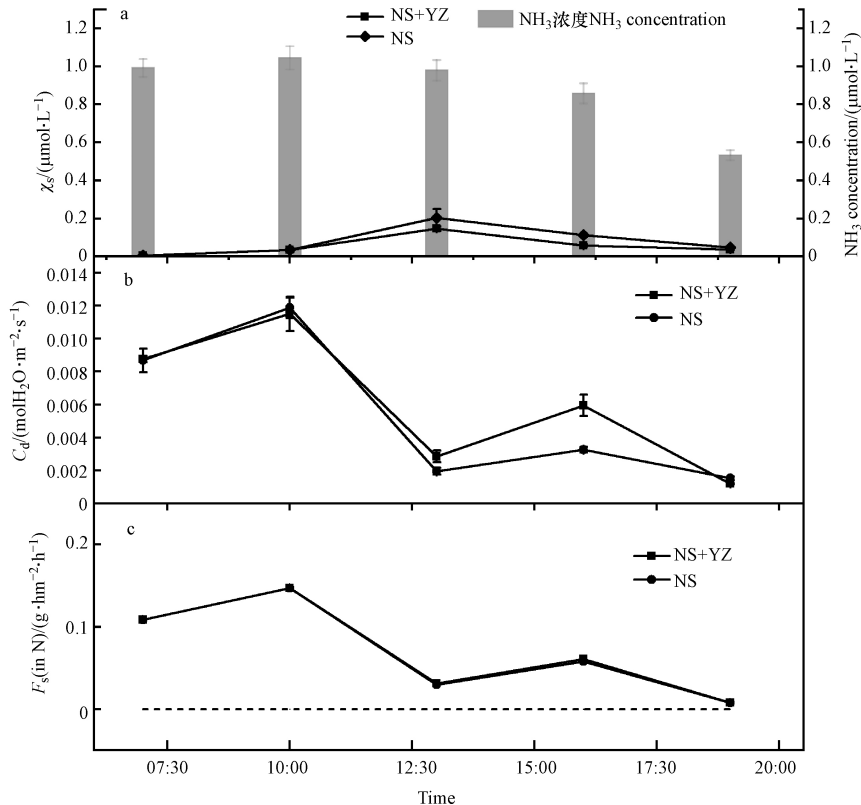


图3 日间两种施肥处理下叶片 χ_s ,气孔导度和 NH_3 排放通量变化

Fig.3 Diurnal variations of wheat χ_s , stomatal conductance and ammonia emission flux in two fertilization treatments

3 结论 (Conclusion)

试验期间小麦 Γ_s 值随生长期变化明显,扬花期及衰老期 Γ_s 值较高,灌浆期 Γ_s 值较低.施肥及施肥后降水均导致小麦 Γ_s 值明显上升,土壤干旱时的降水导致 Γ_s 值下降.小麦扬花期小麦气孔起到吸收 NH_3 的作用,吸收通量主要受到气孔导度影响.两种施肥处理下叶片 Γ_s 具有较大的差异,NS+YZ处理的 NH_4^+ 浓度及 Γ_s 值明显高于NS处理. Γ_s 与 Γ_g 比较发现,虽然脲酶抑制剂的添加降低土壤氨排放潜势,但增加小麦叶片氨排放潜势,因此评估脲酶抑制剂对氨排放的影响时需结合土壤-植被共同评估,这些发现对理解脲酶抑制剂对农田 NH_3 排放的影响有重要意义.

参考文献 (References)

- [1] CHANG S C, CHOU C C K, CHAN C C, et al. Temporal characteristics from continuous measurements of $\text{PM}_{2.5}$ and speciation at the Taipei Aerosol Supersite from 2002 to 2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(8): 1088-1096.
- [2] WANG L, PEDAS P, ERIKSSON D, et al. Elevated atmospheric CO_2 decreases the ammonia compensation point of barley plants [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(10): 2713-2724.
- [3] OSBURN C L, HANDSEL L T, PEIERLS B J, et al. Predicting sources of dissolved organic nitrogen to an estuary from an agro-urban coastal watershed [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(16): 8473-8484.
- [4] CLARK C M, TILMAN D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands [J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 712-715.
- [5] FARQUHAR G D, FIRTH P M, WETSELAAR R, et al. On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment-determination of the ammonia compensation point [J]. *Plant Physiology*, 1980, 66(4): 710-714.

- [6] SCHJOERRING J K, KYLLINGSBEAK A, MORTERSEN J V, et al. Field investigations of ammonia exchange between barley plants and the atmosphere. 1. concentration profiles and flux densities of ammonia [J]. *Plant Cell and Environment*, 1993, 16(2): 161-167.
- [7] SUTTON M A, SCHJOERRING J K, WYERS G P. Plant atmosphere exchange of ammonia [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1995, 351(1696): 261-276.
- [8] FLECHARD C R, MASSAD R S, LOUBET B, et al. Advances in understanding, models and parameterizations of biosphere-atmosphere ammonia exchange [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(7): 5183-5225.
- [9] NERIYNCK J, CEULEMANS R. Bidirectional ammonia exchange above a mixed coniferous forest [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(3): 424-438.
- [10] ZHANG L, WRIGHT L P, Asman W A H. Bi-directional air-surface exchange of atmospheric ammonia: A review of measurements and a development of a big-leaf model for applications in regional-scale air-quality models [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, 115(D20): D20310.
- [11] WANG L, IBROM A, KORHONEN J F J, et al. Interactions between leaf nitrogen status and longevity in relation to N cycling in three contrasting European forest canopies [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2): 999-1011.
- [12] MASSAD R S, NEMITZ E, SUTTON M A. Review and parameterisation of bi-directional ammonia exchange between vegetation and the atmosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(21): 10359-10386.
- [13] MATTSON M, HERRMANN B, JONES S. Contribution of different grass species to plant-atmosphere ammonia exchange in intensively managed grassland [J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(1): 59-66.
- [14] DAVID M, LOUBET B, CELLIER P, et al. Ammonia sources and sinks in an intensively managed grassland canopy [J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(9): 1903-1915.
- [15] MASSAD R S, LOUBET B, TUZET A. Relationship between ammonia stomatal compensation point and nitrogen metabolism in arable crops: Current status of knowledge and potential modelling approaches [C]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(3): 390-403.
- [16] GRANT C A, JIA S, BROWN K R, et al. Volatile losses of NH₃ from surface-applied urea and urea ammonium nitrate with and without the urease inhibitors NBPT or ammonium thiosulphate [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76(3): 417-419.
- [17] HEBER R, MULLER S, MATZEL W, et al. Ammonia losses in urea fertilization, 4. influence of the urease inhibitor phosphoric acid phenyl ester diamide on the amount of NH₃ losses and the fertilizing effect of urea in model and pot experiments [J]. *Archiv Fur Acker Und Pflanzenbau Und Bodenkunde-Archives of Agronomy and Soil Science*, 1979, 23(4): 231-240.
- [18] LICHHEB N, MYLES S, PERSONNE E, et al. Implementation of the effect of urease inhibitor on ammonia emissions following urea-based fertilizer application at a Zea mays field in central Illinois: A study with SURFATM-NH₃ model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269: 78-87.
- [19] MARTINS M R, SANTANNA S A C, ZAMAN M, et al. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N₂O and NH₃ emissions, fertilizer-N-15 recovery and maize yield in a tropical soil [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 54-62.
- [20] ZAMAN M, NGUYEN M L, BLENERHASSETT J D, et al Reducing NH₃, N₂O and NO₃-N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(5): 693-705.
- [21] 徐星凯, 周礼恺, OSWALD, 等. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对土壤中尿素氮转化及形态分布的影响 [J]. *土壤学报*, 2000, 37(3): 339-345.
- XU X K, ZHOU L K, OSWALD, et al. Effects of enzyme inhibitors / nitrification inhibitors on transformation and distribution of urea-N in soil [J]. *Journal of Soil Science*, 2000, 37(3): 339-345 (in Chinese).
- [22] 王趁义, 陈仙仙, 王兆玮, 等. 第四类脲酶抑制剂对土壤脲酶活性和微生物量的影响 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 155-160.
- WANG C Y, CHEN X X, WANG Z W, et al. The fourth type of urease inhibitors on soil urease activity and microbial biomass [J]. *Water and Soil Conservation Notice*, 2019, 39(2): 155-160 (in Chinese).
- [23] 姚凡云, 王立春, 多馨曲, 等. 不同氮肥对东北春玉米农田温室气体周年排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1303-1311.
- YAO F Y, WANG L C, DUO X Q, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on annual greenhouse gas emissions of Spring Maize in Northeast China [J]. *Journal of Ecological Environment*, 2019, 30(4): 1303-1311 (in Chinese).
- [24] 朱永昶, 李玉娥, 秦晓波, 等. 控释肥和硝化抑制剂对华北春玉米 N₂O 排放的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1421-1428.
- ZHU Y C, LI Y E, QIN X B, et al. Effects of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors on N₂O emission from spring maize in North China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1421-1428 (in Chinese).
- [25] 周旋, 吴良欢, 戴峰, 等. 新型磷酸胺类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 4003-4012.
- ZHOU X, WU L H, DAI F, et al. Influence of a new phosphoramidate urease inhibitor on urea-N transformation in different texture soil [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(12): 4003-4012 (in Chinese).
- [26] HUSTED S, SCHAAP M, HAAIMA M, SCHJOERRING J K. Apoplastic pH and ammonium concentration in leaves of brassica-napus. L [J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(4): 1453-1460.
- [27] GOLLAN T, SCHURR U, SCHULZE E. D Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of helianthus-annuus. 1. The concentration of cations, anions, amino-acids in and pH of the xylem sap [J]. *Plant Cell and Environment*, 1992, 15(5): 551-559.
- [28] BACON M A, WILKINSON S, DAVIES W J. pH-regulated leaf cell expansion in droughted plants is abscisic acid dependent [J]. *Plant Physiology*, 1998, 118(4): 1507-1515.
- [29] MORGAN J A, PARTON W J. Characteristics of ammonia volatilization from spring wheat [J]. *Crop Science*, 1989, 29(3): 726-731.
- [30] SCHJOERRING J K, HUSTED S, MATTSSON M. Physiological parameters controlling plant-atmosphere ammonia exchange [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(3): 491-498.
- [31] AFFENDI N M N, MANSOR N, Ammonia stomatal compensation point of young oilseed SAMIRI S S. Addition of chemical and natural urease inhibitors in reducing ammonia and nitrous oxide losses [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(1): 253-258.
- [32] HUSTED S, SCHJOERRING J K, NIELSEN K H, et al. Stomatal compensation points for ammonia in oilseed rape plants under field conditions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105(4): 371-383.