

## 信息与资料 Information and Data

## 农作物的气态氮损失

王世敬<sup>1</sup> 曹宏鑫<sup>2,\*</sup> 段筱香<sup>3</sup> 许兴<sup>1</sup><sup>1</sup>宁夏大学农学院, 银川 750021; <sup>2</sup>江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; <sup>3</sup>宁夏大学物理与电气信息工程学院, 银川 750021

## Gaseous N Losses from Agricultural Crops

WANG Shi-Jing<sup>1</sup>, CAO Hong-Xin<sup>2,\*</sup>, DUAN Xiao-Xiang<sup>3</sup>, XU Xing<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; <sup>2</sup>Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; <sup>3</sup>College of Physics and Electric Information Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**提要** 文章就大田作物气态氮散发损失的概况、散发损失的气态氮形态、气态氮损失机制以及影响作物气态氮损失的内在与外界因素的研究进展作介绍。

**关键词** 农作物; 气态氮; NH<sub>3</sub>; 散发损失

自上世纪70年代以来,有些研究农田生态系统氮素平衡的学者惊奇地发现,氮素平衡账上总有一部分氮素不知去向。后来,谜底终于逐渐揭开。学者们发现,气态氮素可以通过作物绿色组织散发损失掉(Stutte和Weiland 1978; Hooker等1980; Parton等1988; Schlesinger和Hartley 1992; Schjoerring和Mattsson 2001),他们分别以小麦、水稻、玉米、大豆、油菜、豌豆和牧草等多种作物为材料,证实这些作物的绿色组织不仅可以直接散发损失掉氮素,而且其量可观,对作物氮素平衡影响很大。Harper等(1987)在冬小麦田间试验中,观测到小麦开花后损失7.4 kg (N)·ha<sup>-1</sup>,占施入肥料氮的9.8%,或者占收获时植株总氮含量的4%。Parton等(1988)于生长箱中测定到低氮和高氮处理的小麦,抽穗至乳熟后期的气态氮损失各为2.8和4.4 kg (N)·ha<sup>-1</sup>。Hooker等(1980)在实验室的试验中,观察到小麦开花后的氮损失量较低,仅约占植株总氮量的0.1%。而Schjoerring和Mattsson(2001)在连续2年的田间试验中,测得1993(特别干旱的年份)和1994年由施入尿素衍生的NH<sub>3</sub>-N损失总量分别为12和9 kg (N)·ha<sup>-1</sup>,2年分别相当于施入总氮量的7%;他们在这2年测得春大麦的NH<sub>3</sub>-N损失分别为3和5 kg (N)·ha<sup>-1</sup>;油菜植株2年的NH<sub>3</sub>-N损

失分别为3~5和2~3 kg (N)·ha<sup>-1</sup>。据Da Silva和Stutte(1981)报道,水稻一生伴随蒸腾作用由叶损失的氮素总量为15 kg (N)·ha<sup>-1</sup>。Francis等(1993)报道,田间试验的玉米开花后,大量氮素由植株地上部组织散发损失掉,用<sup>15</sup>N标记肥料氮损失的范围是7~34 kg (N)·ha<sup>-1</sup>,但是,植株损失的氮素有些是来自非肥料氮,如果包括非肥料氮在内,则在研究土壤-玉米植株系统氮素平衡和肥料回收率的试验1中为49~78 kg (N)·ha<sup>-1</sup>,在测定氮素由玉米地上部分散发损失的试验2中为45~81 kg (N)·ha<sup>-1</sup>。他们在1997年又进一步报道的实验室研究结果表明,玉米开花前施入的氮肥有5%~7%,开花后施入的氮肥有8%~10%在生殖生长期通过NH<sub>3</sub>散发而损失掉;田间试验中则有近15%施入的<sup>15</sup>N损失掉(Francis等1997)。Stutte和Weiland(1978)研究几种作物和多种牧草气态氮损失和蒸腾作用的结果表明,田间生长的大豆在整个生长季里,通过叶面至少损失45 kg (N)·

收稿 2006-03-13 修定 2006-06-26

资助 宁夏回族自治区科技攻关计划项目(2003-006-01)。

致谢 撰写过程中,宁夏科技信息研究所杨剑和汤雅婷曾协助检索文献。

\*通讯作者(E-mail: caohongxin@hotmail.com, Tel: 025-84390125)。

ha<sup>-1</sup>; 而在同样条件下, 5种牧草的气态氮损失约为大豆的2倍。

还有一些作物, 如棉花和豌豆等, 均可在生长期以气态氮损失大量氮素。Schjoerring和Mattsson (2001)认为, 可耕地上的植物群落是NH<sub>3</sub>进入大气的主要来源。

气态氮散发不仅来自作物绿色组织, 亦可来自牲畜粪便、施肥(有机和无机肥)的土壤(Harper和Sharpe 1995; Tian等2001)。从农田生态角度来说, 这是氮素肥料资源的大量浪费, 会影响作物生长; 而从环境角度来看, 这是一个巨大的大气污染源。据ApSimon等(1987)和Bouwman等(1997)报道, 近一个世纪来, NH<sub>3</sub>散发量不断增加, 在1950~1980年间, NH<sub>3</sub>散发增加50%, 这主要是由持续的集约农业造成的。对于这一问题, 特别是作物绿色组织的气态氮损失, 在我国尚少研究, 国外报道亦少。本文对此问题作简要介绍, 以期能引起国内学者, 尤其是作物生理学界对此问题的关注。

### 1 作物损失的气态氮形态

众多研究者对作物损失的气态氮形态已有研究。Stefanson和Greenland (1970)发现由土壤-植株系统散发损失的是N<sub>2</sub>O。Irving和Hankinson (1980)证明, 置于天门冬氨酸溶液中的植物材料可释放出N<sub>2</sub>。Martin和Ross (1968)用<sup>15</sup>N进行的试验表明, 测到的氮素以N<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>O形态损失的数量并不显著, 但测到有少量的NH<sub>3</sub>通过植株-土壤系统散发掉。Hooker等(1980)将冬小麦栽植于生长箱中, 每周收集测定一次植株散发的气态氮, 在试验的任何时间内仅可测到痕量的NO和NO<sub>2</sub>, 因此认为从总体或表面上看不出通过这些形态的气体散发的氮量, 会显著影响植株氮损失的总量变化, 气态损失部分可能是NH<sub>3</sub>形态从植物组织中散发所致。Weiland和Stutte (1979)报道, 尽管氮的氧化形态可与大气进行交换, 但植株绿色组织与大气之间气体交换的普遍形态是NH<sub>3</sub>。Farquhar等(1980)报道, 叶表皮下气孔腔中含有有限的NH<sub>3</sub>偏压, 进一步证实NH<sub>3</sub>在植株与大气之间有潜在转移力。Harper等(1987)、Da Silva和Stutte (1981)、Weiland和Omholt (1985)等

认为, 尽管散发的氮可以还原态和氧化态从植株组织中释放出来, 但作物开花后氮损失的主要形态是NH<sub>3</sub>。据Da Silva和Stutte (1981)研究, 水稻抽穗期, 不同品种和施入不同氮源(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N或NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)之间以氧化态损失的氮占氮素总损失的8%~28%, 这与Weiland和Stutte (1979)对其它几种作物的测定结果近似。根据Weiland和Omholt (1985)的资料, 玉米在整个生长季的平均氮损失率分别为NO<sub>x</sub> (NO和/或NO<sub>2</sub>) 2.5 ng (N)·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, NO<sub>x</sub>交换率平均在-22.8~22.0 ng (N)·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>之间; 整个生长季的NH<sub>3</sub>平均损失率为13.1 ng (N)·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, NH<sub>3</sub>交换率平均在-0.3~34.8 ng (N)·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>之间(负值是玉米叶吸收的气态氮)。

尽管不同研究者测定农作物以气态形式损失的氮素结果有异, 但对农作物散发损失的气态氮主要以NH<sub>3</sub>形态的认识是一致的。正因为如此, Farquhar等(1980)、Lemon和Houtte (1980)曾提出NH<sub>3</sub>补偿点的概念。所谓NH<sub>3</sub>补偿点是指植株和大气之间不发生NH<sub>3</sub>净交换时周围环境中的NH<sub>3</sub>浓度。当周围环境NH<sub>3</sub>浓度高于NH<sub>3</sub>补偿点时, 作物可吸收NH<sub>3</sub>并成为NH<sub>3</sub>库; 当周围环境NH<sub>3</sub>浓度低于NH<sub>3</sub>补偿点时, 作物可散发NH<sub>3</sub>从而成为NH<sub>3</sub>源。根据Farquhar等(1980)对小麦的测定结果, NH<sub>3</sub>补偿点低于2 μg (NH<sub>3</sub>-N)·m<sup>-3</sup>; 但他们测定小麦开始衰老时, 周围环境中的NH<sub>3</sub>浓度平均为15 μg (NH<sub>3</sub>-N)·m<sup>-3</sup>, 在此种情况下, NH<sub>3</sub>仍然从植株组织中散发损失掉, 可见, 实际环境中NH<sub>3</sub>补偿点可能有相当大的变化。

据Dabney和Bouldin (1990)、Schjoerring等(1993)、Yamulki等(1996)的资料, 在田间和控制条件下的农作物NH<sub>3</sub>补偿点范围为1~6 nmol (NH<sub>3</sub>)·mol<sup>-1</sup> (大气)。Husted和Schjoerring (1996)以油菜为对象的研究表明, NH<sub>3</sub>补偿点可随施氮水平和温度不同而变化。在25℃时, 低氮、中氮、高氮处理植株的NH<sub>3</sub>补偿点各为0.91、2.70和6.31 nmol (NH<sub>3</sub>)·mol<sup>-1</sup> (大气); 在另一组试验中, 高氮植株在25℃下的NH<sub>3</sub>补偿点为(5.80±1.24) nmol (NH<sub>3</sub>)·mol<sup>-1</sup> (大气), 而在(31±1)℃下的为15 nmol (NH<sub>3</sub>)·mol<sup>-1</sup> (大气)。另据Husted等(1996)报道, 大麦的NH<sub>3</sub>补偿点因植株个体发育而变化, 且品

种间有差异; 而Mattsson和Schjoerring (1996a, b) 认为, 根汁液中  $\text{NH}_4^+$  过量的大麦植株比吸收  $\text{NO}_3^-$  的植株似乎有较高的  $\text{NH}_3$  补偿点。

## 2 作物气态氮损失的机制

从目前资料来看, 关于作物气态氮损失的机制, 似乎尚在深入研究阶段。

Hooker等 (1980) 认为, 作物中氧化态氮之所以损失是当氮主要以  $\text{NO}_3^-$  态进入植株根系后, 即被还原为氨态化合物:  $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{HNO} \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NH}_3$ 。  $\text{NH}_3$  进一步转化为胺, 并最终转化为蛋白质。  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  的还原取决于相应的还原酶。硝酸还原酶活性依赖于光和叶绿素的存在。而植株衰老期间, 由于叶绿素逐渐减少, 可能会导致组织中  $\text{NO}_2^-$  的积累。Hooker等 (1980) 和沈文飏 (2003) 据此认为, 这些  $\text{NO}_2^-$  乃是  $\text{NO}_2$  和  $\text{NO}$  气体散发的来源。

散发氮以还原态  $\text{NH}_3$  损失的机制有以下几个学说:

(1)  $\text{NH}_4^+$  毒说。Da Silva和Stutte (1981) 认为, 当离子积累快于它被新陈代谢时, 植物组织中发生  $\text{NH}_4^+$  毒性。还原态氮转化为胺和氨基酸以及它们的再氧化, 是  $\text{NH}_3$ -N 脱毒的机制。施  $\text{NH}_4^+$ -N 的水稻植株在抽穗期呈现高的氮散发损失, 是植株去除过多  $\text{NH}_4^+$ -N 毒性的机制。这种机制在营养液培养条件下尤为适用。因为这种条件下没有土壤, 不可能发生由土壤胶体通过离子交换方式去吸收大比例  $\text{NH}_4^+$ -N, 因而培养液中较高浓度的  $\text{NH}_4^+$  可以较快被根系吸收而进入植物体。Francis等 (1993) 研究玉米气态氮损失时也认为,  $\text{NH}_3$  从植株中散发损失掉可能是由于植株体内  $\text{NH}_4^+$  浓度高之果。  $\text{NH}_4^+$  对植物组织是有毒害的, 并且不会以这一形态在植株内贮存, 这种多余  $\text{NH}_4^+$  的积累遂引起气态  $\text{NH}_3$  的损失。根据Harper等 (1987) 的研究, 小麦在开花前的营养生长阶段和开花后的生殖生长阶段都可以发生气态氮损失。开花前损失是由于有充足的可给态的土壤氮所引起的植株中  $\text{NH}_4^+$ -N 的过剩, 分蘖至拔节阶段施肥后 20 d 的时期里, 土壤和植株的最大量气态氮损失 (占施入氮的 11.4%) 可以说明这一点; 开花后氮损失几乎是植株衰老和植株体内氮素的无效再分配所致,

其中大约有 11% 来自茎叶的于再分配时潜在有效的氮素却以  $\text{NH}_3$  散发的形式损失掉了。

(2) 作物衰老说。大多数研究者认为, 作物开花后的衰老过程是气态氮散发损失的主要时期。Parton等 (1988) 认为, 当小麦植株趋向成熟和衰老加速时, 体内蛋白质水解成氨基酸和胺, 从而可能引起大量的  $\text{NH}_3$  散发。Farquhar等 (1980) 认为, 细胞中 pH 的相对较小变化可能影响组织中的  $\text{NH}_3$  浓度和  $\text{NH}_3$  由叶的流动; O'Deen和Porter (1986) 报道, 小麦籽粒灌浆期间的  $\text{NH}_3$  散发会突然发作, 他们认为其原因可能是开花后酸性蛋白酶活性增加所致。

(3) 光呼吸说。Weiland和Stutte (1979) 观察到  $\text{C}_3$  植物大豆有活跃的  $\text{NH}_3$  散发, 但  $\text{C}_4$  植物高粱不发生这一现象。据此他们认为,  $\text{C}_3$  植物的  $\text{NH}_3$  散发与其依赖于  $\text{O}_2$  的光呼吸循环有关。但Francis等 (1993, 1997) 证实,  $\text{C}_4$  植物玉米在营养生长和生殖生长期间, 植株与大气之间有活跃的  $\text{NH}_3$  交换,  $\text{NH}_3$  损失量相当可观。据Yamaya和Oaks (1987) 研究,  $\text{C}_3$  植物中,  $\text{NH}_3$  由光呼吸产生的速率比  $\text{NH}_3$  由  $\text{NO}_3^-$  还原产生的平均速率高 10 倍。Weiland和Stutte (1979)、Holtan-Hartwig和Bøckman (1994) 根据  $\text{NH}_3$  散发对光和  $\text{O}_2$  的反应得出这样的结论, 认为经由乙二醇途径光呼吸释放  $\text{NH}_3$ , 是植物叶中  $\text{NH}_3$  散发的主要来源。Baron等 (1994) 报道, 无论  $\text{C}_3$  还是  $\text{C}_4$  植物的  $\text{NH}_3$  同化 (吸收) 均与谷酰胺合成酶 (glutamine synthetase, GS) 和谷氨酸酯合成酶 (glutamate synthase, GOGAT) 循环有联系。GS-GOGAT 循环的一个位点是叶绿体。尽管高等植物中  $\text{NH}_3$  进入叶绿体的机制尚不清楚, 但通常认为, 游离态  $\text{NH}_3$  通过叶绿体包膜扩散并进入基质。  $\text{NH}_3$  在各细胞器中的分压与  $\text{NH}_3$  产生过程有关, 而产  $\text{NH}_3$  过程则随其汁液中  $\text{NH}_4^+$  浓度的变化而变化。这样, 这些细胞器中的  $\text{NH}_3$  即可转运。假如所有游离态的  $\text{NH}_3$  不经 GS-GOGAT 循环而被迅速再同化吸收, 即会进一步转运到细胞间隙中, 于是即可能释放到大气中。

## 3 影响作物气态氮损失的因素

影响作物气态氮损失的因素可分为内在因素与环境因素两个方面。

内在因素中主要是作物种和品种。如上所述, 有的学者认为C<sub>3</sub>植物有活跃的NH<sub>3</sub>散发, 但在C<sub>4</sub>植物高粱中则不发生; 而C<sub>4</sub>植物玉米也有活跃的NH<sub>3</sub>交换。在C<sub>3</sub>植物中, 似乎大豆和某些牧草的NH<sub>3</sub>散发也较为活跃。当然, 由于测定时间、技术和条件不同, 不应用这样测定的数据对作物间NH<sub>3</sub>散发的程度进行比较。但是, Stutte和Da Silva (1981)用同样技术研究同样条件下生长的各水稻品种的结果表明, 品种间散发氮损失率有显著差异, 不同品种对温度变化的反应也不同, 当温度从30℃提高到35℃时, 有的品种NH<sub>3</sub>散发强烈增加, 有的品种则增加缓慢。

另一个内在因素是指作物个体发育进程。很多作物的NH<sub>3</sub>散发主要在生殖生长时期。以小麦为例, 其NH<sub>3</sub>散发损失主要在衰老时。据Harper等(1987)报道, 小麦植株约在孕穗期开始衰老, 也正是这一时期, 植株氮显著散失, 并一直持续到籽粒收获。据Hooker等(1980)研究, 冬小麦第1节间伸长时即有微量NH<sub>3</sub>散发, 直至开花, 一直有少量而稳定增长的NH<sub>3</sub>散发(速率为34 μg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)。在开花几天后, 随着籽粒灌浆和植株组织的衰老, NH<sub>3</sub>散发速率增长3倍(达103 μg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)。他们发现, 植株中氮素积累的高峰阶段和植株中氮素损失的开始阶段与NH<sub>3</sub>散发剧增的生长阶段是同步的。这就说明, NH<sub>3</sub>-N散发与冬小麦植株中总氮量降低有关。NH<sub>3</sub>-N散发也可能是氮素平衡亏缺的部分原因。

Francis等(1997)也报道, 玉米营养生长期虽也有NH<sub>3</sub>散发, 但散发的主要时期是生殖生长阶段, 他们证实, 穗产生的NH<sub>3</sub>高于叶, 穗可能是生殖生长期NH<sub>3</sub>散发最多的。Schjoerring和Mattsson (2001)也指出, 油菜高速率的NH<sub>3</sub>散发出现在开花之后, 并持续到收获前。

影响作物气态氮损失的环境因素主要有温度、施氮水平、光照强度等。

(1)温度。据Stutte和Da Silva (1981)研究, 当温度由30℃增至35℃时, 各个水稻品种, 不论稻株处于哪一个生长阶段, 氮散发损失均显著增加。在2个特早熟品种中, 'Labelle'对高温较敏感, 出苗后40和60 d测定的结果表明, 当

温度由30℃增至35℃时, 氮散发损失率分别增加64%和67%; 而'Newrex'对高温敏感性较小, 只分别增加31%和45%。当温度从30℃增至35℃时, 3个中熟品种的氮散发损失增加趋势相似, 在5个测定时期的氮散发损失增加范围是'Bonnet 73'为18%~67%, 'Starbonnet'为25%~69%, 'Nortai'为26%~50%; 'Nortai'随着温度增高而增加的氮散发比前2个品种少。水稻生长的适宜温度范围是21~31℃。35℃高温对植株生长有热胁迫作用。据Lawlor (1979)报道, 在热胁迫下植株蛋白质合成降低, 蛋白质破坏随着氮的释放而加速; 热胁迫也可降低硝酸态氮积累并引起降解氮的过量生成, 在35℃下的氮散发损失速率较高可能是植物对氨离子和降解氮积累的一种防护机制。Schjoerring和Mattsson (2001)也报道, 大气温度对NH<sub>3</sub>交换起决定性影响, 短时期内不断增加温度, 作物植株即由NH<sub>3</sub>库变为NH<sub>3</sub>源(即由吸收NH<sub>3</sub>变为散发NH<sub>3</sub>)。

(2)施氮水平。据Francis等(1993)的研究, 随着施肥量由50 kg (N)·ha<sup>-1</sup>增至175 kg (N)·ha<sup>-1</sup>, 玉米的NH<sub>3</sub>散发损失量显著增长, 肥料的氮损失率和植株总氮损失率也相应增加。Parton等(1988)在生长箱中用营养液培养小麦的试验中发现, 以叶面积为基数的NH<sub>3</sub>损失率尽管是高氮处理仅略高于低氮处理, 但前者的叶面积和绿色叶面积显著高于后者。例如, 籽粒灌浆期测定的结果显示, 高氮处理和低氮处理的NH<sub>3</sub>散发率分别为20和15 ng (NH<sub>3</sub>-N)·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。如果把生长箱试验数据转换成大田下的, 则从小麦抽穗至蜡熟阶段推算高氮和低氮处理的平均损失率分别为4.4和2.8 kg (NH<sub>3</sub>-N)·hm<sup>-2</sup>。

总的说来, 施氮量对NH<sub>3</sub>散发有显著影响; 但氮源则不然。Da Silva和Stutte (1981)以NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N营养液培养2个品种水稻, 见到分蘖和穗分化时期的叶片NH<sub>3</sub>散发损失率并不显著受培养液中氮源种类的影响; 在抽穗期, 生长在NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N培养液中的植株NH<sub>3</sub>散发损失比相应生长在NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N营养液中的略低; 而在测定的3个时期内, 以氧化态氮损失的百分比都不受营养液中氮源影响, 其原因可能与水稻氮代谢机制有关。业

已查明, 水稻植株从幼苗开始积累  $\text{NO}_3^-$ -N 并通过硝酸还原酶的作用进一步合成蛋白质, 其转变速率与  $\text{NH}_4^+$ -N 的相同。

(3) 综合因素。温度和氮素两因素同时增长时, 作物的  $\text{NH}_3$  散发明显增加, Husted 和 Schjoerring (1996) 用分别含 0.15、0.30 和 0.50 mol N 的 3 种营养液在温室中培养油菜时观察到, 随着叶温的升高, 油菜植株  $\text{NH}_3$  散发量随着营养液浓度的增加而明显呈指数增长。最明显的是高氮处理, 其植株的  $\text{NH}_3$  散发由 15℃ 时的  $0.1 \text{ nmol} (\text{NH}_3) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  增至 32℃ 时的  $27 \text{ nmol} (\text{NH}_3) \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 25℃ 时,  $\text{NH}_3$  补偿点也随浓度升高依次大幅度提高。

光照强度、湿度和大气  $\text{NH}_3$  水平等也影响作物与周围大气之间的  $\text{NH}_3$  交换。Wetselaar 和 Farquhar (1980) 提出, 植物叶片气孔导度最大时氮损失最大, 这种情况常发生在高光照强度、充足的湿度、高温、高营养特别是高氮水平下, 所有这些条件在玉米生殖生长期常常是最易得到满足的。

### 参考文献

- 沈文飏 (2003). 硝酸还原酶也是植物体内的 NO 合成酶. 植物生理学通讯, 39 (2): 168~170
- ApSimon HM, Kruse M, Bell JNB (1987). Ammonia emissions and their role in acid deposition. Atmos Environ, 21: 1939~1987
- Baron AC, Tobin TH, Wallsgrove RM, Tobin AK (1994). A metabolic control analysis of the glutamine synthetase/glutamate synthase cycle in isolated barley (*Hordeum vulgare* L.) chloroplasts. Plant Physiol, 105: 415~424
- Bleakley BH, Tiedje JM (1982). Nitrous oxide production by organisms other than nitrifiers or denitrifiers. Appl Environ Microbiol, 44: 1342~1348
- Bouwman AF, Lee DS, Asman WAH, Dentener FJ, Van Der Hoek KW, Olivier JGJ (1997). A global high-resolution emission inventory for ammonia. Global Biogeochem Cy, 11: 561~587
- Da Silva PRF, Stutte CA (1981). Nitrogen volatilization from rice leaves. II. Effects of source of applied nitrogen in nutrient culture solution. Crop Sci, 21: 913~916
- Dabney SM, Bouldin DR (1990). Apparent deposition velocity and compensation point of ammonia inferred from gradient measurements above and through alfalfa. Atmos Environ, 24A: 2655~2666
- Farquhar GD, Firth PM, Wetselaar R, Weir B (1980). On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: determination of the ammonia compensation point. Plant Physiol, 66: 710~714
- Francis DD, Schepers JS, Sims AL (1997). Ammonia exchange from corn foliage during reproductive growth. Agron J, 89: 941~946
- Francis DD, Schepers JS, Vigil MF (1993). Post-anthesis nitrogen loss from corn. Agron J, 85: 659~663
- Harper LA, Sharpe RR (1995). Nitrogen dynamics in irrigated corn: soil-plant nitrogen and atmospheric ammonia transport. Agron J, 87: 669~675
- Harper LA, Sharpe RR, Langdale GW, Giddens JE (1987). Nitrogen cycling in a wheat crop: soil, plant, and aerial nitrogen transport. Agron J, 79: 965~973
- Holtan-Hartwig L, Bøckman OC (1994). Ammonia exchange between crops and air. Norw J Agr Sci, 14 (Suppl): 1~41
- Hooker ML, Sander DH, Peterson GA, Daigger LA (1980). Gaseous N losses from winter wheat. Agron J, 72: 789~792
- Husted S, Mattsson M, Schjoerring JK (1996). Determination of  $\text{NH}_3$  compensation points in two cultivars of *Hordeum vulgare* L. influence of plant developmental stage. Plant Cell Environ, 19: 1299~1306
- Husted S, Schjoerring JK (1996). Ammonia flux between oilseed rape plants and the atmosphere in response to change in leaf temperature, light intensity, and air humidity. Plant Physiol, 112: 67~74
- Irving AA, Hankinson R (1980). The presence of a nitrate reducing enzyme in green plants. Biochem J, 3: 87~96
- Lawlor DW (1979). Effect of water and heat stress on carbon metabolism of plants with  $\text{C}_3$  and  $\text{C}_4$  photosynthesis. In: Mussel H, Staples C (eds). Stress Physiology in Crop Plants. New York: John Wiley & Sons, 304~326
- Lemon E, Houtte RV (1980). Ammonia exchange at the land surface. Agron J, 72: 876~883
- Martin AE, Ross PJ (1968). A nitrogen-balance study using labeled fertilizer in a gas lysimeter. Plant Soil, 28 (1): 182~186
- Mattsson M, Schjoerring JK (1996a). Ammonia emission from young barley plants: influence of N source, light/dark cycles and inhibition of glutamine synthetase. J Exp Bot, 47: 477~484
- Mattsson M, Schjoerring JK (1996b). Characteristics of ammonia emission from barley plants. Plant Physiol Biochem, 34: 691~695
- O'Deen WA, Porter LK (1986). Continuous flow system for collecting volatile ammonia and amines from senescing winter wheat. Agron J, 78: 746~749

- Parton WJ, Morgan JA, Altenhofen JM, Harper LA (1988). Ammonia volatilization from spring wheat plants. *Agron J*, 80: 419~425
- Schjoerring JK, Kyllingsbæk A, Mortensen JV, Byskov-Nielsen S (1993). Field investigation ammonia exchange between barley plants and the atmosphere. I. Concentration profiles and flux densities of ammonia. *Plant Cell Environ*, 16: 161~167
- Schjoerring JK, Mattsson M (2001). Quantification of ammonia exchange between agricultural cropland and the atmosphere: measurements over two complete growth cycles of oilseed rape, wheat, barley and pea. *Plant Soil*, 228: 105~115
- Schlesinger WH, Hartley AE (1992). A global budget for atmospheric  $\text{NH}_3$ . *Biogeochemistry*, 15: 191~211
- Stefanson RC, Greenland DJ (1970). Measurement of nitrogen and nitrous oxide evolution from soil-plant systems using sealed growth chambers. *Soil Sci*, 109: 203~206
- Stutte CA, Da Silva PRF (1981). Nitrogen volatilization from rice. I. Effects of genotype and air temperature. *Crop Sci*, 21: 596~600
- Stutte CA, Weiland RT (1978). Gaseous nitrogen loss and transpiration of several crop and weed species. *Crop Sci*, 18: 887~889
- Tian G, Cai Z, Cao J, Li X (2001). Factors affecting ammonia volatilization from a rice-wheat rotation system. *Chemosphere*, 42: 123~129
- Weiland RT, Omholt TE (1985). Method for monitoring nitrogen gas exchange from plant foliage. *Crop Sci*, 25: 359~361
- Weiland RT, Stutte CA (1979). Pyro-chemiluminescent differentiation of oxidized and reduced N forms evolved from plant foliage. *Crop Sci*, 19: 545~547
- Wetselaar R, Farquhar GD (1980). Nitrogen losses from tops of plants. *Adv Agron*, 33: 263~302
- Yamaya T, Oaks A (1987). Synthesis of glutamate by mitochondria: an anaplerotic function for glutamate dehydrogenase. *Physiol Plant*, 70: 749~756
- Yamulki S, Harrison RM, Goulding KWT (1996). Ammonia surface-exchange above an agricultural field in Southeast England. *Atmos Environ*, 30: 109~118