植物冠层对氨的吸收研究进展①

周 伟[1,2]，田玉华[1*]，尹 斌[1]

（1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室（中国科学院南京土壤研究所），南京 210008；2 中国科学院研究生院，北京 100049）

摘 要： 植物冠层吸收大气中的NH_3是植物与大气NH_3交换的一个主要过程。本文对植物冠层吸收NH_3的吸收机理、研究方法和影响因素、以及大气NH_3浓度升高对植物N 循环的影响进行了总结，对植物冠层吸收NH_3研究中存在的问题进行了讨论，并介绍了水稻冠层吸收施肥后挥发NH_3的最新研究结果。

关键词： 冠层吸收；氨；水稻

中图分类号： S511；S143

近几十年来，随着世界经济和人口的迅速增长，全球大气活性 N 排放急剧上升[1]，目前全球每年大约有9.3×10^6 mol的NH_3进入大气层，并且有不断增加的趋势[2]。NH_3浓度的升高可引起一系列的生态环境问题：在大气中可被氧化为温室气体NO_X，沉降到陆地和水体生态系统，引起物种迁移和水体富营养化等[3-4]。有关NH_3排放尤其是施 N 肥的农田生态系统的NH_3排放研究已经持续了许多年，是陆地N循环研究的一个热点问题[5-6]，然而，农田生态系统是由土壤-植物-大气组成的复杂体系，N肥的投入使该系统的N素活动更加活跃，NH_3排放更加复杂。生长在土壤中的作物是农田生态系统的核心，已有的研究表明在植物生长初期，植物冠层能够直接吸收利用大气中的NH_3[7]。因此，若要完整评价农田NH_3排放，作物冠层不可忽视，这对于评价农田向大气 NH_3排放以及丰富作物 N 素营养理论，减少农田向大气的 NH_3 排放均具有重要意义。

1 冠层对空气中氨的吸收

研究表明，一些豆科、禾本科以及森林植物会吸收空气中的 NH_3[8-9]，尤其是在土壤贫瘠的地区，Hutchinson等[7]估计，每公顷植物冠层每年从大气中可吸收 20 kg NH_3-N，Happer 等[10]用微气象学法测得夏季牧草吸收的总N中有大约11%的N是来自大气中的NH_3。Langford和Fehsenfeld[11]研究发现，山区与农田接壤的森林冠层会吸收农田挥发出来的 NH_3。Denmead等[12]发现同一块草地不放牧羊群的地块NH_3挥发量远小于放牧处理的地块，他们认为这是冠层对NH_3的吸收造成表观NH_3挥发量减少。Hao等[13]研究了牧场附近的植物对牧场挥发出来的 NH_3 的吸收情况，结果发现植物对NH_3存在直接吸收，越靠近NH_3挥发源，吸收率越高，最高能达到 19%。这些研究均表明植物对NH_3存在直接的吸收。

以上研究大多是集中在自然或半自然的生态系统中，在这些生态系统中，人为增加的N较少，也有研究表明即使在人为外加 N 十分充足的农田中冠层对NH_3的吸收现象依然存在，Happer等[14]发现，当土壤供 N 受到限制时开花前的小麦会主动吸收空气中的NH_3。Sommer等[15]指出，从土壤或肥料中挥发出来的NH_3有一部分会被冬小麦的冠层吸收。Denmead等[16]研究发现，每公顷玉米生长前期每小时从大气中吸收6.6 g NH_3-N。Ping等[17]用同位素示踪法研究了冬小麦对施肥后土壤挥发NH_3的吸收情况，结果表明两次施肥小麦冠层对NH_3都存在吸收。Fenilli等[18]发现，5 年生咖啡植物可吸收NH_3挥发的 40%，Hayashi等[19]利用模型估测水稻冠层对NH_3也存在吸收。这些研究表明，植物冠层对 NH_3 的吸收不仅存在于 N 素欠缺的自然环境的植物中，在外加 N 十分充足的农田生态系统中，植物冠层对 NH_3 的吸收依然存在。

2 冠层吸收氨的机理

冠层对空气中NH_3的吸收途径主要有两条，一是

①基金项目：国家重点基础研究发展计划项目（2009CB118603）和中国科学院南京土壤研究所知识创新工程领域前沿项目（ISSASIP0701）资助。

* 通讯作者（yhtian@issas.ac.cn）

作者简介：周伟（1985—），男，江西吉安人，硕士研究生，主要研究方向为土壤氮素与环境。E-mail: wzhou@issas.ac.cn

通过气孔吸收；二是通过表层吸收。生长箱实验表明，通过表皮层吸收的NH_3仅占 NH_3吸收的 3%。NH_3的吸收主要是通过气孔进行的，其吸收量和吸收速率取决于气孔导度、温度、光照和空气湿度等，空气相对湿度高，光照强时，植物气孔导度增加，从而增加了NH_3的吸收，气孔导度与NH_3吸收具有相关性。实验发现，在 20% 大气相对湿度下，植物对NH_3的吸收随光密度的增加而非直线性增加，当光密度增至 350 umol/(m·s) 时，吸收达到最大值，随空气湿度增加，NH_3 吸收增加，但无饱和效应，与空气湿度成线性相关关系[20-21]。这可能是因为空气湿度越大，植物气孔导度增加从而增加了NH_3 的吸收。

植物营养状况，尤其是N素营养状况对植物吸收NH_3有明显影响。低N营养植物比高N植物能从大气中吸收更多的NH_3，且随着外界NH_3 浓度的增加，吸收也呈线性增加[22]。植物体吸收NH_3 的快慢还取决于植物对 NH_3 的同化水平，Grundmann[23]认为植物对大气NH_3的吸收与同化存在两种模式，一种是快速吸收，然后立即同化；一种是快速存储然后再进一步的代谢，后一种模式在储存的过程中可能会迟滞植物对NH_3 的吸收。植物中与NH_3吸收关系最密切的一个酶是谷酰胺合成酶（GS），它是高等植物将NH_3合成有机N的主要酶。GS在植物幼苗和根系中都能发现，在大多数绿色植物中它的含量很丰富，并且它有一个较宽的pH适应范围，活性也很高[24]。不同植物对吸收的NH_3 的同化产物也有所不同，试验表明植物从大气中吸收NH_3后，叶片的N 含量增加，叶绿素a和叶绿素b增加，从而导致光合速率增加[25]。也有一些试验发现植物从大气中吸收大量的NH_3后，植物体内的氨基酸含量增加，将植物暴露在过量的NH_3环境中，黄叶中游离精氨酸含量比绿叶中高很多[26]。

3　冠层吸收氨的决定因素：氨补偿点

植物吸收NH_3的实质是叶片与大气进行气体交换的结果。吸收NH_3的动力来自叶片细胞间隙与大气NH_3分压的差值，植物吸收NH_3 后，会转化NH_4^+，在植物细胞中存在着NH_3/NH_4^+间的转化平衡[27]。当环境中的 NH_3分压大于细胞间隙 NH_3分压，植物体会吸收大气NH_3；反之植物则可能向大气中排放NH_3。当植物既不向外界释放也不从外界空气中吸收NH_3 时，此时空气中NH_3 的浓度称为该植物的 NH_3 补偿点。通常所指的植物NH_3补偿点是指在 25℃ 植物的NH_3 补偿点，其计算方法主要有两种[28]，从细胞角度看，NH_3 补偿点等于叶肉细胞非原生质体的 NH_3 的分浓度或者分压。因此根据质外体NH_4^+与NH_3 浓度以及质外体的pH值，计算出NH_3补偿点（X_{NH_3}）：

$$X_{NH_3} = K_H \times \frac{K_d \times C_{tot}}{K_d + [H^+]}$$

式中，$C_{tot} = [NH_4^+] + [NH_3]_{aq}$，$K_H$ 为NH_3的水解常数，K_d 为NH_4^+的解离常数，$[H^+]$ 为质外体H^+浓度。

另外一种方法是将植物放入一定NH_3 浓度（NH_3 10 nmol/mol air）的空气中，并逐渐升高温度使植物吸NH_3 速率逐渐下降，到一定温度时，植物开始释放NH_3。此时空气中和叶片细胞间隙中的NH_3分压相等，该温度下空气中的NH_3补偿点即为 10 nmol/mol air。应用以下公式便可以计算出其他温度的NH_3补偿点X_{NH_3}。

$$\ln \frac{X_2}{X_1} = \frac{\Delta H_{dis} + \Delta H_{vap}}{R} \times \left[\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right]$$

式中，X_1，T_1 表示实测的NH_3补偿点和当时的温度；T_2 为所要计算NH_3补偿点的温度；一般在 40℃ 以下，X_2表示在T_2时NH_3补偿点的计算值；R是气体常数，为 8.31 J/mol K；　ΔH_{dis} 和 ΔH_{vap}分别表示NH_4^+ 水解和NH_3挥发时的 $\triangle H$（焓值）。

在不同的条件下，植物的 NH_3 补偿点可能相差很大。目前已经报道的几种供试植物的补偿点接近于未被污染空气中 NH_3 的分压，也接近于真空中谷酰胺合成酶的米氏常数 Km。

4　氨补偿点的大小及其影响因素

目前测得的一些植物的NH_3补偿点范围大致在 0.1 ~ 20 nmol/mol 范围内[21,29]，生活在低 N 输入生态系统（如沼泽地、森林等）中的植物，其NH_3 补偿点几乎为零，而在田间条件下农作物的NH_3 补偿点一般分布在 1 ~ 6 nmol/mol 范围内。Hill等[30]进行的研究表明，NH_3 补偿点与植物的生育期、原生质体原生质pH等有关。Morgan和Parton[31]发现，春小麦在灌浆初期，NH_3 补偿点为 13 μg/m^3，灌浆晚期增至 23 μg/m^3，成熟期达到最高为 25 μg/m^3，冬小麦的补偿点则在 15 μg/m^3 左右，在小麦生长期间NH_3 补偿点最高可达 40 μg/m^3。由于植物叶片与环境之间NH_3 的交换主要决定于叶片细胞间隙与大气中NH_3 的浓度梯度，因此凡是能影响细胞间隙NH_3浓度的因素都会影响NH_3 补偿点，如叶温、光照强度、空气湿度等环境因素以及质外体pH、光呼吸速率及谷酰胺合成酶活性等内部因素[32-33]。

5 冠层吸收氨以及对植株氮循环的影响

冠层与大气间的NH_3交换主要是通过叶表组织（气孔）进行，表皮（通过角质层及叶表水）也能吸收少量的NH_3。图 1 详细地说明了植物冠层对NH_3 的吸收过程以及植物对此的响应[34]。虽然已有的研究对植物冠层吸收NH_3 的途径及其对植物的影响已经有了较多的阐述，但这些研究产生的结论大都是室内试验的结果或者是由此而得出的推测，存在很大的不确定性。此外，对于图中所列各个过程 N 循环通量和其影响因素以及不同的生态系统中的植物对此的响应敏感度等还缺乏足够的研究，因此要想了解和评价整个过程还需要进行系统的实验研究。

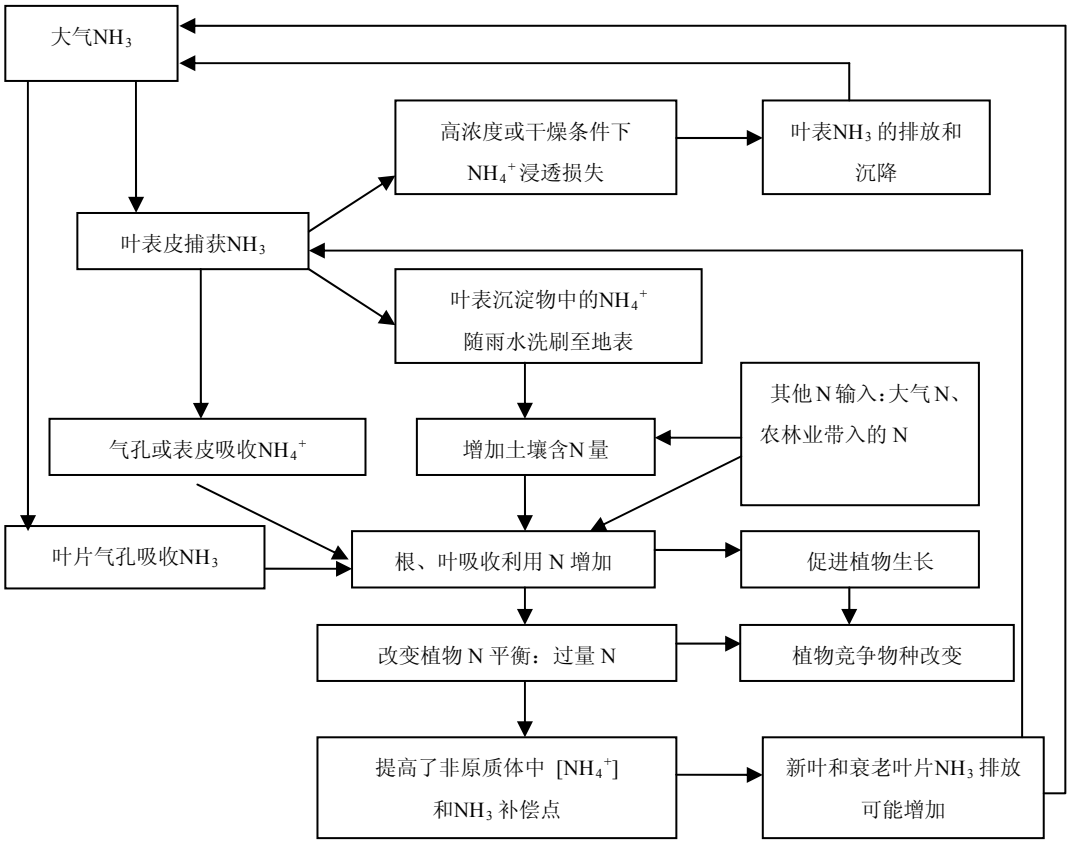

图 1 植物冠层NH_3循环过程及其对植物的影响

Fig. 1 NH_3 circulation of plant canopy and effect on plant

生长在自然生态系统中的植物，通过冠层吸收的NH_3是其生长所需N源的重要来源，以往的研究多集中在N亏缺条件下的植物与大气NH_3 之间的交换过程尤其是植物对此的响应过程。而对于生长的高N或者N富余的环境中的农作物而言，其冠层吸收NH_3 的研究较少[35]。

6 植物冠层吸收空气中氨的研究方法

研究植物冠层吸收空气中NH_3 的方法主要包括直接测定、间接测定和模型预测。直接测定包括密闭室法和微气象学法。密闭式法多用于室内或盆栽试验研究。微气象学法多用于田间原位研究，可分层测定冠层不同高度以及冠层上空的NH_3 浓度，同时测定风速、温度等环境条件，通过这些参数的修正确定不同层次NH_3 浓度的差异，从而确定冠层不同部位NH_3 循环过程。Nemitz等[36]用微气象学法测定了油菜不同部位NH_3 的交换过程，发现油菜冠层离地 0.33 m的部分是白天吸收NH_3 的主要部位，而 0.33～0.85 m的部位净排放NH_3。但微气象学法需要 1 hm^2 以上的实验面积，且需要精密的仪器测定风速、温度和大气NH_3 浓度的变化等参数，因此该方法主要用于大型生态区域的气体动态研究[37]，直接法的局限性在于时间和地点的不连续性。

间接测定主要是采用差减法或者同位素标记的方法计算冠层吸收NH_3 的量。Hao[13]通过测定离NH_3 挥发源不同距离杂草的N含量，通过与背景区的比较从而

计算出杂草对NH_3 的吸收效率。但这种方法需要大面积的研究区域和一个准确的背景值，因而难以运用于农田生态系统，并且此方法难以区分植物体中富集的N是来自植物冠层直接吸收的NH_3 还是大气中的NH_3 沉降至土壤中被植物吸收。Ping等[17]则是用^{15}N标记的肥料与土壤混合作为一个NH_3 挥发源，用同位素示踪的方法研究了田间条件下小麦对挥发出来的NH_3 的吸收情况。但同位素标记法测定NH_3 挥发损失率往往高于微气象学法，原因可能是间接方法测定的是作物N素的减少量，N 可能是以还原态的NH_3 挥发损失，也可能是其他形态的如氧化态和有机态的形式挥发，还可能是由于$^{15}NH_3$ 与$^{14}NH_3$ 在植物表面不断进行动态交换引起的[38]。

采用模型预测是研究较大区域内的植物与大气之间 NH_3 交换的一个发展趋势，按模型应用的生态类型不同可分为两类模型：①冠层阻力模型，该模型适用于自然或半自然生态系统；②NH_3 补偿点模型，该模型适用于农田或施 N 肥的草地[39]，目前比较常用的模型包括拉格朗日类型（Lagrangian type），如 FRAME 模型（5 km × 5 km）和 OPS；以及欧拉类型（Eulerian type），如 DEHM（16.67 km × 16.67 km）、EMEP 模型（50 km × 50 km）和后来发展的 EMEP4UK 模型（5 km × 5 km）[40]，冠层吸收空气中的 NH_3 是这些模型中的一个重要模块[41]。Denmead 等[33]用拉格朗日模型模拟了甘蔗冠层大气 NH_3 交换过程并与微气象学测定的结果进行了比较，发现冠层以上的模型模拟的结果与实测值非常相符，但冠层以下的模拟值与实测值相差很大，Harper 等[42]的研究结果也表明拉格朗日模型模拟的冠层以下的数值与已有的研究结果相差很大。Nemitz 等[36]认为这是由于冠层以下 NH_3 浓度、水分条件、以及其他参数的测定受到很多因素的干扰（冠层密度、植物残体的分解等），因而影响了模拟结果的准确性。Sommer 等[43]采用 DEHM 和 EMEP 相结合的方法模拟了作物对养殖场挥发 NH_3 的吸收利用，与实测值相吻合。这些模型的发展和应用主要集中于欧洲自然生长的生态系统如森林、草地或是施肥量较低的农田生态系统，对于集约化程度较高的农田生态系统相应的模型报道很少。因此，不同生态系统的植物冠层与大气 NH_3 交换的模型应用仍需要大量试验研究的数据支持。

7　水稻冠层对氨的吸收

水稻是亚洲种植最多的农作物，稻田施N量大，施肥后NH_3 挥发损失严重[44-45]，但水稻冠层与空气中的 NH_3 交换作为冠层与大气NH_3 交换的一个重要组成部分，目前还缺乏系统的研究，尤其是田间原位研究。Hayashi等[19]利用模型估算，认为水稻对施肥后产生的 NH_3 存在吸收再利用情况。Ashraf等[46]将水稻暴露在用^{15}N标记的NH_3 的密闭室中，表明水稻叶片能吸收空气中高浓度的NH_3。

为了解田间条件下水稻冠层吸收施肥后挥发的 NH_3，我们在常熟农业生态试验站进行了初步的研究，利用大型密闭室通气法分别测定土-水-冠层和土-水系统的NH_3 挥发量，在施肥后供试小区田面水pH、NH_4^+-N 和水温等因素无明显差异的条件下，2 个系统 NH_3 挥发量的差异明显，表明水稻冠层对挥发的NH_3 有明显吸收（图 2）。尤其是施肥后前 3 天，由于NH_3 挥发量比较大，水稻冠层对NH_3 的吸收也非常明显。

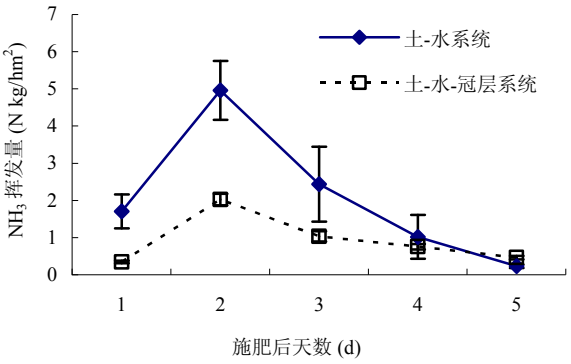

图 2　水稻追肥后土-水系统和土-水-植株冠层系统的NH_3挥发动态变化

Fig. 2　Ammonia emission from soil (plant sealed) and soil-rice plant system after fertilization

稻田施肥后短时间内挥发出来的大量NH_3 势必会在水稻冠层处形成一个高浓度NH_3 环境，超过一般作物的NH_3 补偿点，从理论上可推测水稻冠层可吸收从土-水系统中挥发出来的NH_3，我们的初步研究结果也证实了这一点，然而，冠层吸收NH_3 挥发这一环节对稻田N素损失以及稻田施肥对大气环境的影响等方面需要进一步深入研究。

8　研究展望

从以上的分析可以看出，国内外的研究主要集中在植物冠层吸收NH_3 的机理、NH_3 补偿点的确定及其影响因素，冠层吸收NH_3 后对植物代谢和生理特征的影响等方面，并且这些研究主要集中在欧洲自然生态系统或施N量较低的农田系统[4]。现有的研究冠层吸收 NH_3 的方法存在一定的局限性和不确定性，微气象学法与模型模拟相结合的方法虽然是目前比较有效的研

究手段，但由于该方法需要精密的仪器和较高的费用使得其难以大规模应用。因此方法上的改进是急需解决的问题。

以往的研究多集中在自然生态系统的植物，在大量施肥的农田中，有关作物冠层吸收NH_3 挥发的研究很少[19, 47]。我们的初步研究证实了施N后产生的NH_3 挥发部分能被水稻冠层吸收利用，这对于评估稻田N素损失、稻田施N对环境的影响均有不可忽视的影响，因此，对于农作物冠层吸收NH_3 挥发的受控因素以及所吸收的NH_3 的去向等都需要进一步的研究。

参考文献：

[1] Galloway JN, Dentener FJ, Capone DG. Nitrogen cycles: Past, present, and future. Biogeochemistry, 2004, 70: 153−226

[2] Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, Vander EL, Jäger HJ. Effects of atmospheric ammonia on vegetation–A review. Environmental Pollution, 1994, 86: 43−82

[3] Aneja VP, Roelle PA, Murray GC, Southerland J, Erisman JW, Fowler D, Asman WAH, Patni N. Atmospheric nitrogen compound II: Emissions, transport, transformation, deposition and assessment. Atmos. Environ., 2001, 35(11): 1 903−1 911

[4] Krupa SV. Effects of atmospheric ammonia (NH_3) on terrestrial vegetation: A review. Environmental Pollution, 2003, 124: 179−221

[5] Strader R, Davidson C. Airborne reduced nitrogen: Ammonia emissions from agriculture and other sources. Environmental International, 2003, 29(2/3): 277−286

[6] Sutton MA, Erisman JW, Dentener F, Möller D. Ammonia in the environment: From ancient times to the present. Environmental Pollution, 2008, 156: 583−604

[7] Hutchinson GL, Millington RJ, Peters DB. Atmospheric ammonia: Absorption by plant leaves. Science, 1972, 175: 771−772

[8] Pérez-Soba M, Van Der Eerden LJM. Nitrogen uptake in needles of scots pine (pinus sylvestris) when exposed to gaseous ammonia and ammonium fertilizer in the soil. Plant siol, 1993, 153: 231−242

[9] Herrmann B, Neftel A. Ammonia exchange with grasslands. Agrarfarschung., 2002, 9(7): 280−285

[10] Happer LA, Bussink DW, Van Der Meer HG, Corr'e WJ. Ammonia transport in a temperate grassland I. Seasonal transport in relation to soil fertility and crop management. Agron. J., 1996, 88: 614−621

[11] Langford AO, Fehsenfeld FC. Natural vegetation as a source or sink for atmospheric ammonia: A case study. Science, l992, 255: 581−583

[12] Denmead OT, Freney JR, Sipson A. Closed ammonia cycle within a plant canopy. Siol Biol. Biochem., 1976, 8: 161−164

[13] Hao XC, Chang HH, Janzen CG, Hill BR. Sorption of atmospheric ammonia by soil and perennial grass downwind from two large cattle feedlots. Journal of Environmental Quality, 2006: 1 960−1 965

[14] Happer LA, Sharper R, Langdale GW, Giddens JE. Nitrogen cycling in a wheat crop: Soil, plant, and aerial nitrogen transport. Agron. J., 1987, 79: 965−973

[15] Sommer SG, Jensen ES, Schjoerring JK. Leaf absorption of atmospheric ammonia emited from pig slurry applied beneath the canopy of winter wheat. Acta Agric. Scand. Sect B: Soil and Plant Sci., 1993, 13: 21−24

[16] Denmead OT, Nulsen R, Thurtell GW. Ammonia exchange over a corn crop. Soil Science Society of America, 1978, 12: 810−8l2

[17] Ping J, Bremer E, Janzen HH. Foliar uptake of volatilized ammonia from surface applied urea by spring wheat. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(1/2): 165−172

[18] Fenilli TAB, Reichardt K, Trivelin PCO, Favarin JL. Volatilization of ammonia derived from fertilizer and its reabsorption by coffee plants. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2007, 38: 1 741−1 751

[19] 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. Science of The Total Environment, 2008, 390: 485−494

[20] Husted S, Schjoerring JK. Ammonia flux between oilseed rape plant and the atmosphere in response to changes in leaf temperature. light intensity and air humidity. Plant Physiol., 1996, l12: 67−74

[21] Van Hove LWA, Heeres P, Bossen ME. The annual variation in stomatal ammonia compensation point of rye grass (*Lolium perenne* L.) leaves in an intensively managed grassland. Atmospheric Environment, 2003, 36: 2 965−2 977

[22] Pearson J, Srewart GR. The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. New Phyto1., 1993, 125: 283−305

[23] Grundmann GL, Lensi R, Chalmet A. Delayed ammonia and nitrous oxide uptake by maize leaves. New Phytol., 1993. 124: 259−263

[24] Mcnally SF, Hirel B, Gadal P, Mann AF, Stewart GR. Glutamine

synthetases of higher plants evidence for a specific isoform content related to their possible physiological role and their compartmentation within the leaf. Plant Physiology, 1983, 72: 22−25

[25] Eamus D, Fowler D. Photosynthetic and stomatal conductance responses to acid mist of red spruce seedlings. Plant Cell and Environment, 1990, 13: 349−357

[26] Van Pijk HFG, Roelofs JGM. Effects of excessive ammonium deposition on the nutritional status and condition of pine needles. Physiologia Plantanim., l988, 73: l 494−1 501

[27] Farquhar GD, Wetselaar R, Firth PM. Ammonia volatilization from senescing leaves of maize. Science, 1979, 203: l 257−l 258

[28] Farquhar GD, Firth PM, Wetselaar R, Weir B. On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: Determination of ammonia compensation point. Plant Physio1., 1980, 66: 710−7l4

[29] Sutton MA, Moncrieff JB, Fowler D. Deposition of atmospheric ammonia to moorlands. Environmental Pollution, 1992, 75: 15−24

[30] Hill PW, Raven JA, Sutton MA. Regulation of growth development and whole organism physiology: Leaf age-related differences in apoplastic NH_3 concentration pH and NH_3 compensation point for a wild perennial. Journal of Experimental Botany, 2003, 53: 277−286

[31] Morgan JA , Parton WJ. Characteristics of ammonia volatilization from spring wheat. Crop Sci., 1989, 29: 726−731

[32] Mattsson M, Hausier RE, Leegood RC, Leap J, Schjoerring JK. Leaf-atmosphere NH_3 exchange in barley mutants with reduced activities of glutamine synthetase. Plant Physiol., 1997, 1l1: l307−1 312

[33] Denmeacd OT, Freney JR, Dunin FX. Gas exchange between plant canopies and the atmosphere: Case-studies for ammonia. Atmospheric Environment, 2008, 42(14): 3 394−3 406

[34] Sutton MA, Fowler D, Burkhardt JK, Milford C. Vegetation atmosphere exchange of ammonia: Canopy cycling and the impacts of evaluated nitrogen inputs. Water, Air and Soil Pollution, 1995, 85: 2 057−2 063

[35] 李世清, 赵琳, 绍明安, 张兴昌, 上官周平. 植物冠层与大气氨交换研究进展. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2 154−2 162

[36] Nemitz E, Sutton MA, Gut A, San Jose R, Husted S, Schjoerring JK. Sources and sinks of ammonia within an oilseed rape canopy. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 105: 385−404

[37] 吴小庆, 徐阳春, 沈其荣. 植物叶片氨挥发研究进展. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 80−84

[38] Bronson KF, Hussain F, Pasuquin E. Use of ^{15}N-labeled soil in measuring nitrogen fertilizer recovery efficiency in transplanted rice. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 235−239

[39] Wichink Kruit RJ, van Pul WAJ, Sauter FJ, van den Broek M, Nemitz E, Sutton MA, Krol M, Holtslag AAM. Modeling the surface-atmosphere exchange of ammonia. Atmospheric Environment, 2010, 44: 945−957

[40] Van Pul A, Hertel O, Geels C, Dore A J, Vieno M, van Jaarsveld HA, Bergström R, Schaap M, Fagerli H. Modelling of the atmospheric transport and deposition of ammonia at a national and regional scale. // Sutton M, Reis S, Baker SMH. Atmospheric Ammonia. Netherlands: Springer, 2009

[41] Vieno M. The Use of an Atmospheric Chemistry-Transport Model (FRAME) over the UK and the Development of Its Numerical and Physical Schemes (Ph.D. thesis). Edinburgh, UK: University of Edinburgh, 2005

[42] Harper LA, Denmead OT, Sharpe RR. Identifying sources and sinks of scalars in a corn canopy with inverse Lagrangian dispersion analysis. II. Ammonia. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104: 75−83

[43] Sommer SG, Østergård HS, Løfstrøm P, Andersen HV, Jensen LS. Validation of model calculation of ammonia deposition in the neighbourhood of a poultry farm using measured NH_3 concentrations and N deposition. Atmospheric Environment, 2009, 43: 915−920

[44] 朱兆良. 农田氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1−6

[45] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 朱兆良. 太湖地区氮磷施用对稻田氨挥发的影响. 土壤学报, 2007, 44(5): 893−900

[46] Ashraf M, Mahmood T, Azam F. Translocation and recovery of ^{15}N-labelled N derived from foliar uptake of $^{15}NH_3$ by rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. Biol. Fertil. Soils, 2003, 38: 257−260

[47] Denmead OT, Freney JR, Dunin FX. Gas exchange between plant canopies and the atmosphere: Case-studies for ammonia. Atmospheric Environment, 2008, 42(14): 3 394−3 406

Research Progress in Ammonia Absorption by Plant Canopy

ZHOU Wei[1,2]， TIAN Yu-hua[1]， YIN Bin[1]

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture* (*Institute of Soil Science*, *Chinese Academy of Sciences*), *Nanjing* 210008, China;

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Ammonia Absorption by plant canopy is recognized as an important part of NH_3 exchange between plant canopy and atmosphere. The research advance of NH_3 absorbed by plant canopy was reviewed in this paper, mainly including the methods for determining ammonia absorption, the mechanism of ammonia absorption and the influencing factors as well as the influences of increasing NH_3 concentration in atmosphere on plant nitrogen cycle. Problems need to be solved of ammonia absorption in future research were discussed and the latest research results of foliar uptake of volatilized ammonia after fertilization by rice were also presented in this paper.

Key words: Canopy, Ammonia, Rice