

大气 NH₃ 浓度升高对不同氮效率玉米生理指标及生物量的影响

陈小莉¹ 李世清^{1,2*} 任小龙² 强虹² 吉春容² 闫登明²

(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 该试验采用开顶式气室 (Open top chambers) 装置, 在两种大气 NH₃ 浓度水平 (大气背景浓度为 10 nl L⁻¹ 和高 NH₃ 浓度 1 000 nl L⁻¹) 和两种供氮介质水平 (高供氮介质和低供氮介质) 下, 对两种氮效率玉米 (*Zea mays*) 基因型 ('氮高效 5 号' (NE5) 和 '氮低效四单 19' (SD19)) 的叶绿素指标值 (*SPAD* 值)、净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、生物量和根冠比等生物学和生理学指标进行了测定。结果表明, 大气 NH₃ 浓度升高对两种氮效率玉米基因型各生理指标有显著影响 ($p < 0.05$)。与大气背景 NH₃ 浓度相比, 当大气 NH₃ 浓度为 1 000 nl L⁻¹ 时, 生长在高供氮介质中 '氮高效 5 号' 的 *SPAD* 值、 P_n 和 G_s 分别降低 7.0%、14.0% 和 6.5%, 而 '氮低效四单 19' 的对应指标分别降低 9.0%、11.0% 和 6.9%; 生长在低供氮介质中的两种氮效率玉米基因型各生理指标均显著增加 ($p < 0.05$): '氮高效 5 号' 的 *SPAD* 值、 P_n 和 G_s 分别增加 5.7%、7.1% 和 17%, '氮低效四单 19' 的对应指标分别增加 7.0%、11.0% 和 22.0%。高供氮介质中 NH₃ 浓度升高对氮低效基因型玉米冠层生物量抑制作用小于对氮高效基因型玉米的抑制效应, 而低供氮介质中 NH₃ 浓度升高对氮高效基因型玉米冠部的促进作用显著高于对氮低效基因型玉米的促进作用 ($p < 0.05$); 两种大气 NH₃ 营养下玉米根冠比的变化与采样时期有关。说明从大气中吸收 NH₃ 有利于改善生长在低供氮介质上玉米的氮素营养状况, 而且对氮低效基因型玉米的促进作用比对氮高效基因型玉米更加显著。

关键词 玉米 NH₃ 浓度升高 氮效率 基因型 生理指标

INFLUENCE OF INCREASED ATMOSPHERIC NH₃ ON PHYSIOLOGY INDEX AND BIOMASS OF MAIZE WITH DIFFERENT N EFFICIENCY

CHEN Xiao-Li¹, LI Shi-Qing^{1,2*}, REN Xiao-Long², QIANG Hong², JI Chur-Rong², and YAN Deng-Ming²

¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil Erosion and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China, and ²College of Resources and Environment Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract Aims The main aim of this study was to investigate the response of various physiology indexes, e. g., chlorophyll index value (stand for the relative content of chlorophyll, *SPAD* value), net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and root shoot ratio (R/S) in two genotypes of maize (*Zea mays*) to NH₃ concentration enrichment.

Methods We grew maize on Hoagland solution in PVC pots in open top chambers (OTCs). The experiment was a split-split plot design, which main treatments were two NH₃ concentrations (10 and 1 000 nl L⁻¹). The sub-plot treatments of the experiment were two levels of nitrogen (high and low), and sub-sub-plot treatments were two N efficiency genotypes (high N efficiency, 'NE5', and low N efficiency, 'SD19'). Air flow in OTCs was controlled by small fans and atmospheric NH₃ concentration was measured accurately by two methods (NH₃ determination tubes and GIL-C atmosphere detecting apparatus).

Important findings Under elevated atmospheric NH₃, there were significant differences ($p < 0.05$) for physiology indexes between the two varieties, 'NE5' and 'SD19'. Under high N medium, compared with 10 nl L⁻¹ atmospheric NH₃ concentration, the *SPAD* value, P_n and G_s of 'NE5' treated with 1 000 nl L⁻¹ decreased 7.0%, 14.0% and 6.5%, respectively, and the corresponding targets of 'SD19' decreased 9.0%, 11.0% and 6.9%, respectively. Under low N medium, various physiology indexes of the two varieties significantly increased, i. e., the *SPAD* value, P_n and G_s of 'NE5' increased 5.7%, 7.1% and 17%, respec-

收稿日期: 2006-10-30 接受日期: 2007-02-03

基金项目: 国家自然科学基金 (30571116 和 30670326)

*通讯作者 Author for correspondence E-mail: spl@ms.iswc.ac.cn

tively, and the relative value of 'SD19' increased 7.0%, 11.0% and 22.0%, respectively. The results also demonstrated that under high N medium, the inhibition effect of increased atmospheric NH₃ on 'SD19' shoot biomass was obviously lower than that of 'NE5', while under low N medium, NH₃ concentration enrichment had more positive influence on 'NE5' ($p < 0.05$) than 'SD19'. Moreover, the ratio of roots to shoots of 'NE5' and 'SD19' in the two atmospheric NH₃ concentrations was related to maize growth periods, i. e., there were different changes for their root and shoot biomass in three sampling time, but still obeying certain laws. All these results indicated that the absorbed atmospheric NH₃ by plants can improve crop nitrogen nutrition growing in low N medium, and there may be more significantly positive effect on low nitrogen efficiency genotypes.

Key words *Zea mays*, NH₃ concentration enrichment, N efficiency, genotypes, physiology indexes

大气 NH₃ 既是重要的大气污染物,也是一些植物的重要氮素来源 (Schjoerring *et al.*, 1998; Beat & Albrecht, 2002)。目前全球每年大约有 9.3×10^6 mol NH₃ 进入大气层,并呈不断上升趋势 (Fangmeier *et al.*, 1994)。NH₃ 浓度的增加势必会影响大气环境质量和生态平衡,因此对大气 NH₃ 含量变化的关注越来越多。过去认为,大气 NH₃ 主要来自于肥料和动物排泄物中 NH₃ 的挥发、含氮有机化合物的矿化和燃烧以及煤等化石燃料的燃烧 (Hegg *et al.*, 1990)。以后研究表明,植物生长过程也可向大气释放含氮气态化合物 (Husted & Schjoerring, 1996; 李生秀等, 1995; 王朝辉等, 2001),以 NH₃ 为主,NO_x 次之 (O Deen & Porter, 1986)。植物除了挥发 NH₃,其冠层可直接吸收大气中的 NH₃。研究发现,大气 NH₃ 是豆科、禾本科植物和一些森林植物的重要氮素来源 (Pérez-Soba & van der Eerden, 1993; Schjoerring *et al.*, 1998; Beat & Albrecht, 2002)。

大气 NH₃ 在一定浓度范围内增加,对植物生理过程会产生深刻影响 (van Hove *et al.*, 1991)。植物吸收大气 NH₃ 后不仅会改变草原植物群落组成及植物体的 C/N 比 (Wedin & Tilman, 1996),增加森林等植被对 CO₂ 的固定 (Nadelhoffer *et al.*, 1999),而且在一定程度上会抑制根系对硝态氮的吸收 (Hanstein *et al.*, 1999),减少光合产物消耗 (由于在吸收和还原硝态氮时消耗的能量比铵态氮多) (Mengel & Kirkby, 1987),对低碳架植物根部代谢会产生显著影响。但 van Hove 等 (1991) 用气室法研究表明,长期暴露在 $64 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ 空气中的白杨 (*Populus euramericana*) 叶片,能够增加 CO₂ 同化速率、气孔导度和对 NH₃ 的吸收。van der Eerden 和 Pérez-Soba (1992) 研究表明,植物叶片对 NH₃ 的吸收能增加酶活性,诱导气孔进一步开放,促进叶片对 NH₃ 和 CO₂ 吸收,并且使光子通量密度增加,从而导致光合作用增加;同时由 NH₃ 浓度升高所导致的气孔开放能够

增加蒸腾速率,可改变植物水分关系 (Dueck *et al.*, 1990; van der Eerden & Pérez-Soba, 1992)。赵平等 (2003) 对生长在 NH₄⁺-N 和 NH₄NO₃-N 介质中的大叶相思 (*Acacia auriculaeformis*) 叶片研究发现,增加大气 NH₃ 浓度对光合速率、光呼吸、CO₂ 补偿点、RuBP 饱和羧化酶和最大电子传递速率等光合参数的影响是正效应还是负效应,主要取决于光照强度。李世清等 (2004) 进行的初步试验表明,植物 NH₃ 补偿点的大小与植物种类和生育期有关,玉米生长前期以吸收为主,后期则以释放为主。另一方面,如果大气中 NH₃ 浓度过高、叶片从大气中对 NH₃ 的吸收超过同化能力时,NH₃ 会在植物体中累积,产生毒害作用 (Fangmeier *et al.*, 1994)。

从以上分析可见,国内外对大气微量 NH₃ 的研究已取得了卓有成效的结果,但研究主要集中在大气 NH₃ 浓度较高的欧洲 (Krupa, 2003),研究对象以森林和草原植物单叶为主,很少涉及植株和群体,将大气 NH₃ 营养与不同氮效率基因型和供氮介质水平结合起来的研究结果鲜见报道。大气 NH₃ 作为营养物质,在一定范围内浓度增加会改变禾本科植物氮素营养状况和同化产物分配,进而影响作物根冠特征及氮利用效率 (影响程度取决于作物氮效率高低和供氮介质水平)。我们以此作为基本科学假设,拟通过试验初步探讨以下科学问题:1) 植物冠层吸收大气 NH₃ 后,是否会对净光合速率、同化产物分配、根/冠比等产生影响;2) 大气 NH₃ 作为营养物质,是否对生长在低供氮介质上植物的氮素营养效果更加显著;3) 当生长介质氮素供应充分时,是否会在一定程度上限制大气 NH₃ 营养的作用和效果。本论文报道了我们在此方面获得的一些研究结果。

1 材料和方法

1.1 植物材料

试验在中国科学院水利部水土保持研究所试验

场的开顶式气室(Open top chambers, OTCs; 共4台)内进行。以两种不同氮效率玉米(*Zea mays*)基因型:‘氮高效5号’(NE5)和‘氮低效四单19’(SD19)玉米品种为指示作物,进行水培试验。NE5是中国农业大学资源环境学院玉米研究课题组组配的氮高效杂交组合;SD19是吉林省四平市农业科学院于1984年以自选系444作母本,外引系MO17为父本,杂交育成的中熟高淀粉玉米单交种,属氮低效玉米基因型。

1.2 供NH₃装置

试验采用研究植物对CO₂浓度升高反应的开顶式气室装置。开顶式气室在目前应用较为广泛,是比较接近自然条件的模拟装置。该装置由NH₃气源、空气控制系统和开顶式气室3大部分组成,其中开顶式气室由风扇、框架、室壁和底座4部分组成。

1.2.1 NH₃气源

以液氨钢瓶(内直径600 mm,总长度1800 mm)作为供气容器,NH₃纯度为95%。通过YQA-441型NH₃减压表(压力范围为0~4 MPa;上海双盈船用减压阀制造有限公司生产)和8型定压氧气管将NH₃气由底部输入开顶式气室。通过LZB-2防腐型玻璃转子流量计(测量范围6~60 ml·min⁻¹;额定工作压力1 MPa)控制进入气室的NH₃流量。

1.2.2 空气控制系统

由ZB-0.10/8空气压缩机(排气量为0.1 m³·min⁻¹;额定气压为0.8 MPa)和8型定压氧气管将空气由底部输入开顶式气室。通过LZB-10型玻璃转子流量计(测量范围0.25~2.5 m³·h⁻¹;额定工作压力1 MPa)将空气以1.7 L·min⁻¹的流量输入气室。

1.2.3 开顶式气室

气室设计为四面体柱型,气室框架为镀锌铁结构,正四边形,高1.5 m,边长1.2 m,整个气室体积约为3 m³。为减少外部气流从气室顶部侵入,框架顶部为一开口平截的圆锥体,面积为底面积的1/2。为尽可能减少气室壁对有效光辐射吸收,气室壁材料选用有机玻璃。气室内部温度和湿度通过底部多孔管输入空气调控,NH₃浓度通过底部NH₃输入多孔管控制。在气室内安装风扇,以促进气室中NH₃的均匀分布,同时起到冷却作用,气室内风速不超过0.5 m·s⁻¹。测定发现,作物生长期气室内温度比环境气温高出3~5℃,但通NH₃和不通NH₃处理气室内温度一致,说明气室内温度升高不是由NH₃处理引起,而是气室自身产生的温室效应,与其它温室效应

气体相比,通NH₃气室NH₃浓度较低,且NH₃本身温室效应有限。由于通NH₃和不通NH₃气室内温度相同,因此不影响对NH₃处理效果的比较研究。

1.3 NH₃浓度检测装置

气室内不同高度和部位的NH₃浓度先后由两种NH₃检测装置检测,每天测定4次,时间分别为8:00、11:00、14:00和17:00,测定时不影响通气。首先通过容积为100 ml的HLA-2手动抽气泵(北京环安科技发展中心生产)采样,共采气300 ml,待NH₃检测管(检测范围0.2~6 mg·m⁻³)中的粉色纳氏试剂变色终止,即可从蓝色柱判断气室内NH₃的大致浓度;由于空气中NH₃浓度的背景值很低,需通过NH₃测试精度为0.01 mg·m⁻³(符合国家标准测试精度要求)的GIL-C型室内空气检测仪(配有型号为pH618的测试笔一支)准确测定大气NH₃浓度,具体操作方法:在通气前先将三角架和仪器连好放置在气室中央,用注射器吸取5 ml NH₃测试试剂,注入到玻璃采样瓶中,盖上进气塞,将采样瓶挂在仪器上连接好,检测时将仪器面板开关打开,将流量调至2 L·min⁻¹,仪器内设有自动定时装置,抽气时间一到将自动关闭,将采样瓶取下,拿掉进气塞,将里面的试剂倒入测试杯中,将测试笔插入杯中,开启测试笔,待数字稳定后直接读出数据,根据测试笔显示数据,查附表可得出空气中NH₃浓度。经过两周的连续调试与测定发现,试验附近空气NH₃背景浓度值基本稳定在10 nl·L⁻¹,气室中高NH₃浓度准确控制在1000 nl·L⁻¹。玉米生长期每隔2 h检测一次,调节NH₃浓度维持在1000 nl·L⁻¹,每天从8:00~18:00连续供NH₃(下雨天除外,需盖上气室顶盖),晚上停止供气(夜间气孔关闭,植物不吸收大气NH₃)。

1.4 幼苗的培育和定植

用10% H₂O₂对玉米种子进行消毒,经12 h吸涨后在瓷盘内石英砂中育苗,上覆干净湿滤纸,在23

℃下于暗中发芽。幼苗刚长出时移去滤纸,待根长到2~4 cm时,移植到带孔的塑料泡沫上,用脱脂棉固定在盛水的培养盘上,每天换水一次并通气。经过8~12 d,根系伸长达5~7 cm后,进行溶液培养定植。定植时应选择生长均一的幼苗,每盆定植2~3株,用海绵固定,待生长正常时再间苗,每盆留一株。幼苗移入气室3 d后开始正常供NH₃。

1.5 水培试验

水培试验盆钵采用PVC材料制成的培养盆(内径15 cm,高20 cm),每盆盛营养液3.5 L。试验因子

包括大气 NH₃ 浓度、供氮水平和不同氮效率玉米基因型 3 个。大气 NH₃ 浓度设空气背景浓度 (10 nl · L⁻¹) 和高 NH₃ 浓度 (1 000 nl · L⁻¹) 两个水平; 作物选氮效率差异显著的两种玉米基因型: NE5 和 SD19; 对每一氮效率玉米基因型, 设高供氮和低供氮两种介质供氮水平。试验采用裂区设计, NH₃ 浓度设为主因素, 供氮水平为副因素。两个品种设为副区, 共 8 个处理组合, 分别放置在 4 个开顶式气室中, 即 NH₃ 浓度处理设两次重复。即在同一大气 NH₃ 处理气室中, 每气室放置 32 盆, 即各处理重复 8 次。为减少气室引起的试验误差, 作物和 NH₃ 浓度间隔处理一定时间 (10 d) 在 4 个气室中互换。水培营养液采用 Hbagland 营养液配方: 其中大量元素分别为 Ca(NO₃)₂ · 4H₂O 0.95 g · L⁻¹、KNO₃ 0.61 g · L⁻¹、MgSO₄ · 7H₂O 0.49 g · L⁻¹、NH₄H₂PO₄ 0.12 g · L⁻¹; 阿依微量元素混合液 H₂BO₃ 2.86 g · L⁻¹、MnCl₂ · 4H₂O 1.81 g · L⁻¹、ZnSO₄ · 7H₂O 0.22 g · L⁻¹、CuSO₄ · 5H₂O 0.08 g · L⁻¹、Na₂MoO₄ · 2H₂O 0.025 g · L⁻¹ 和酒石酸铁 (0.5% FeSO₄ · 7H₂O 和 0.4% 酒石酸)。两种介质供氮水平只改变氮, 高供氮介质中氮含量是基础溶液中的 1/3, 低供氮介质中氮含量是基础溶液中的 1/9, 缺少的 Ca²⁺、K⁺ 和 H₂PO₄⁻ 分别由 CaSO₄ · 2H₂O、KCl 和 KH₂PO₄ 补充。用 HCl 调节溶液 pH 值至 5.9。在作物生长期间用充气泵对营养液每天通气 4 h, 不断补充蒸馏水保持各盆中液面高度一致, 营养液现配, 每周更换一次。为防止营养液吸收和溶解大气 NH₃, 对营养液采用特殊的处理。即在营养液中加入能够抑制气相和液相之间发生 NH₃ 交换的高碳醇 (16 + 18 烷醇) 乳化后配成的乳剂后 (Yin *et al.*, 1996), 再在水培盆钵顶部放置盖板 (中间留有可供作物生长的孔), 在海绵与植株茎秆接触的部位缠上透明胶带, 并用石蜡密封。为保证作物正常生长, 利用充气系统充分向营养液充无 NH₃ 空气, 吸收瓶中的液体采用 1 mol · L⁻¹ 稀 H₂SO₄¹⁾, 能有效吸收空气中的 NH₃。

1.6 试验测定及统计分析

出苗后 30 d, 即作物供 NH₃ 20 d 后, 每隔 10 d 用完全展开的同位叶测定有关生理指标数据; 同时对每一处理取 2~3 盆测定根系和地上部生物量, 并计算植株根冠比 (R/C); 生理指标包括净光合速率

(P_n)、气孔导度 (G_s) 和叶绿素相对含量 (SPAD 值)。光合速率和气孔导度由美国生产 LF6400 光合仪测得, 在 9 00~11 00 (植物充分活化) 间测定; 叶绿素相对含量由日产 SPAD-502 叶绿素仪 (CHLOROPHYLL METER) 测定, 它可以立即测量植物叶绿素相对含量或“绿色程度”, 使用仪器测量获得的 SPAD 表示了叶片中叶绿素相对含量, SPAD 值与叶片氮含量及叶绿素具有很密切的相关性 (Peng *et al.*, 1993)。非离体叶片测定及取样分别在 2006 年 6 月 10、20 和 30 日进行, 选择这 3 个时间测定, 考虑了两方面的原因, 一是本阶段为供试玉米拔节快速生长期, 表现为每隔 10 d 其生物量会发生明显变化, 对氮素营养比较敏感; 二是考虑到植物对大气 NH₃ 的吸收及其营养效果主要在生长前期 (李世清等, 2004)。

所有试验数据至少重复 3 次以上, 其中净光合速率和气孔导度至少重复 10 次以上。试验数据用统计分析软件 DPSv3.11 专业版处理; 表中所列结果为各次重复平均值; 对测定结果进行方差分析, 并用 LSR (新复极差法, 即 Duncan 法) 法进行多重比较; 方差分析包括大气 NH₃ 浓度、供氮介质水平和不同氮效率基因型的主效应以及它们之间两因素和三因素的交互作用。

2 结果与分析

2.1 大气 NH₃ 浓度升高对两种氮效率玉米基因型 SPAD 值、P_n 和 G_s 的影响

SPAD 值可以反映玉米叶片中叶绿素的相对含量, 与叶片叶绿素含量及氮素含量呈密切正相关关系 (Peng *et al.*, 1993)。本研究结果表明, 高供氮介质下, 玉米功能叶 SPAD 值的 3 次测定结果表明 (表 1), 氮低效基因型 SD19 叶片的 SPAD 值显著低于氮高效基因型 NE5 同位叶 SPAD 值 ($p < 0.05$), 说明不同氮效率玉米基因型 SPAD 值存在显著差异。大气 NH₃ 浓度升高, 两种氮效率基因型玉米 SPAD 值均呈下降趋势: 与 10 nl · L⁻¹ NH₃ 浓度相比, NE5 降低 7.0%, SD19 降低 9.0%, 说明在高供氮介质下, 高的大气 NH₃ 浓度对供试玉米基因型 SPAD 值具有一定抑制作用, 并且对氮低效基因型抑制作用更加突出。在低供氮介质下, 对不同取样期玉米功能叶 SPAD 值的测定结果表明 (表 1), 相同 NH₃ 浓度下, 氮高效

1) Tian XH (田霄鸿) (1992). Ammoniacal Nitrogen Loss from Wheat and Maize by Volatilization During Their Growth Periods (小麦和玉米生长过程中氨态氮素的挥发损失). Master dissertation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi, 3-8. (in Chinese with English abstract)

基因型 NE5 的 SPAD 值高于氮低效基因型 SD19, 这种差异在各次测定时均达显著水平 ($p < 0.05$), 与低供氮介质相同。随大气 NH₃ 浓度升高, 两种氮效率基因型的 SPAD 值均呈上升趋势: 与 10 nl L⁻¹ NH₃ 浓度相比, 在 1 000 nl L⁻¹ NH₃ 浓度下, NE5 和 SD19

同位叶的 SPAD 值均显著增高, NE5 的 3 次测定平均增加 5.7%, SD19 增加 7.0%, 显然, 氮低效基因型的增加幅度大于氮高效基因型, 说明在低供氮介质下, 高浓度大气 NH₃ 有利于提高 SPAD 值, 对植物捕获更多光能进行光合作用有促进作用。

表 1 不同供氮介质下 NH₃ 浓度升高对不同时期氮高效 5 号 (NE5) 和氮低效四单 19 (SD19) 的 SPAD 值、P_n 和 G_s 的影响
Table 1 Effects of increased atmospheric NH₃ on SPAD value, P_n and G_s for different growth stages of NE5 and SD19 with various N supplies

基因型 Genotype	NH ₃ 浓度 NH ₃ concentration (nl L ⁻¹)	SPAD 值 SPAD value				P _n (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)				G _s (mmol m ⁻² s ⁻¹)			
		6月10日 June 10	6月20日 June 20	6月30日 June 30	平均 Average	6月10日 June 10	6月20日 June 20	6月30日 June 30	平均 Average	6月10日 June 10	6月20日 June 20	6月30日 June 30	平均 Average
		高供氮介质 High N medium											
NE5	10	43.6	45.4	47.1	45.4 ^a	23.6	25.8	26.5	25.3 ^b	0.20	0.24	0.26	0.23 ^b
SD19	10	38.2	40.0	42.3	40.2 ^b	26.3	29.1	29.8	28.4 ^a	0.28	0.32	0.33	0.31 ^a
NE5	1 000	40.1	42.1	44.5	42.2 ^a	19.9	21.8	23.6	21.8 ^b	0.11	0.14	0.18	0.14 ^b
SD19	1 000	34.7	36.6	38.4	36.6 ^b	22.3	25.6	28.0	25.3 ^a	0.27	0.31	0.29	0.29 ^a
低供氮介质 Low N medium													
NE5	10	37.6	39.6	41.6	39.6 ^a	21.0	23.3	26.4	23.6 ^a	0.17	0.19	0.22	0.19 ^a
SD19	10	33.9	35.9	37.9	35.9 ^a	17.5	19.3	21.5	19.4 ^b	0.11	0.13	0.18	0.14 ^a
NE5	1 000	40.0	42.0	44.0	42.0 ^a	22.1	25.3	28.8	25.4 ^a	0.19	0.24	0.26	0.23 ^a
SD19	1 000	36.3	38.3	40.3	38.3 ^b	18.9	21.8	24.3	21.7 ^b	0.15	0.18	0.21	0.18 ^b

相同介质供氮条件下, 同列不同字母表示差异性达 5% 显著水平 Under the same N supplies, mean values within a column with the same letter (s) are not significantly different at $p = 0.05$ probability level in same supplying N medium

不同取样期 P_n 的测定结果表明 (表 1), SD19 的 P_n 明显高于 NE5, 差异达显著水平 ($p < 0.05$)。高供氮介质下, NH₃ 浓度升高导致两种氮效率基因型的 P_n 平均值分别下降 14.0% 和 11.0%。与在 10 nl L⁻¹ 大气 NH₃ 浓度相比, 在 1 000 nl L⁻¹ 大气 NH₃ 浓度下, 两种氮效率基因型的 P_n 均明显下降, 与 van der Eerden 和 Péczez-Soba (1992) 的试验结果不一致, 可能原因在于: 在高供氮介质下, 作物体内氮素丰富, 过高的大气 NH₃ 浓度对作物产生抑制作用, 并且对氮高效基因型的抑制作用更加突出, 但结果的可靠性还有待于进一步试验证明。在低供氮介质下, 不论是 10 nl L⁻¹, 还是 1 000 nl L⁻¹ NH₃ 浓度, SD19 的 P_n 明显低于 NE5, 其差异达 5% 显著水平; 两种氮效率基因型 P_n 随 NH₃ 浓度升高均呈增加趋势, 从 3 次测定平均值看, NE5 和 SD19 分别增加 7.1% 和 11.0%。说明在低供氮介质条件下, 作物通过充分吸收大气 NH₃ 而改善作物氮素营养状况, 表现为大气 NH₃ 浓度升高对玉米的净光合速率有明显的促进作用。

NH₃ 吸收主要通过气孔进行, 其吸收速率和吸收量与 G_s 有关。不同时期测定的 G_s 表明 (表 1), 在两种大气 NH₃ 浓度下, SD19 的 G_s 显著高于 NE5 ($p < 0.05$), 说明不同氮效率玉米基因型的 G_s 存在

显著差异。高供氮介质条件下, 两种氮效率玉米基因型 G_s 随 NH₃ 浓度升高均表现为下降趋势: NE5 下降 6.5%, SD19 下降 6.9%, 这与 Husted 和 Schjoerring (1996) 的试验结果不一致, 产生这一结果的原因可能在于介质供氮高时, 植物体内氮素营养丰富, 通过某种反馈机制, 如降低 G_s 而限制对大气 NH₃ 的吸收, 其原因还需进一步研究。

对低供氮介质 (表 1), 在相同大气 NH₃ 浓度下, 氮低效基因型 SD19 的 G_s 显著低于氮高效基因型 NE5 ($p < 0.05$), 与生长在高供氮介质的情况相同。两种氮效率基因型的 G_s 随 NH₃ 浓度的变化趋势与 P_n 一致: 高的大气 NH₃ 浓度下两种氮效率基因型的 G_s 显著高于低的大气 NH₃ 浓度, NE5 的 G_s 增加 17%, SD19 增加 22%, 说明在低供氮介质时, 大气 NH₃ 浓度增高有利于促进叶片气孔导度增加, 并对氮低效基因型的促进作用更加突出, 该结果与 Husted 和 Schjoerring (1996) 的试验结果一致。Husted 和 Schjoerring (1996) 在对杨属植物用 64 mol · m⁻³ NH₃ 处理后发现, 在空气相对湿度较高, 光照较强时, 不仅导致植物气孔导度和光合增加, 而且也会增加对大气 NH₃ 的吸收; 同时还有研究发现气孔导度与 NH₃ 的吸收具有相关性 (Pearson & Stewart, 1993)。本研究也进一步证明, 在低供氮介质下, 随

植物叶片 G_s 增加, 大气 NH₃ 营养对 P_n 表现出显著的正效应。

2.2 NH₃ 浓度升高对两种氮效率玉米基因型生物量和根冠比的影响

在高供氮介质下, 3 次测定中 SD19 的生物量均显著低于 NE5 (表 2), 不管是根系、茎叶, 还是总生物量, 均存在类似的差异。随 NH₃ 浓度增加, 两种基因型生物量下降, 并随生育期延长, 下降幅度增加。从 3 次测定平均值看, NE5 的根系、茎叶和总生物量分别下降 12.2%、14.9% 和 15.5%; SD19 分别下降 12.5%、14.8% 和 16.9%。而在低供氮介质下, 3 次测定中 SD19 的根系、茎叶以及总生物量显著低于 NE5 的相应指标 (表 2); 随 NH₃ 浓度增加, 两种基因型生物量增加, 从 3 次测定平均值看, NE5 的根系、茎叶和总生物量分别增加 7.4%、6.3% 和 6.4%, SD19 分别增加 17.7%、7.1% 和 9.7%, NH₃ 浓度对氮低效基因型的促进作用比氮高效基因型更加突出。

根冠比是植株根系和冠层干重之比。测定结果表明 (表 3), 不论玉米生长在 10 nl L⁻¹ 还是 1 000

nl L⁻¹ 大气 NH₃ 浓度下, 每次测定时 SD19 的根冠比低于 NE5。随大气 NH₃ 浓度升高, NE5 根冠比在 3 个测定时期均呈现增加趋势, 而 SD19 根冠比在前两次测定时没有明显差异, 说明在供氮介质高时, 大气 NH₃ 浓度升高对两种氮效率基因型冠层和根系的抑制程度不同, SD19 根冠比在第三次测定下降 16%, 这一结果表明高的大气 NH₃ 浓度对根冠比的影响与生长时间有关。总体上, 在高供氮介质下, 大气 NH₃ 浓度升高对氮低效基因型冠层抑制作用小于对氮高效基因型的抑制作用; 在低供氮介质下, 从后两次测定平均看 (表 3), 与 10 nl L⁻¹ NH₃ 浓度相比, 在 1 000 nl L⁻¹ NH₃ 浓度下, NE5 根冠比平均下降 6.9%, 而 SD19 根冠比平均增加 5.5%, 说明低供氮介质下 NH₃ 浓度升高对氮高效基因型冠层的促进作用显著高于氮低效基因型, 导致根冠比降低; 大气 NH₃ 浓度对两种氮效率基因型苗期 (6 月 10 日) 根冠比基本没有影响, 这与苗期主要以根系生长有关。

2.3 NH₃ 浓度升高对两种氮效率玉米基因型 SPAD 值、P_n、G_s 和根冠比影响的交互作用

表 2 不同供氮介质下 NH₃ 浓度升高对‘氮高效 5 号’ (NE5) 和‘氮低效四单’ (SD19) 生物量的影响 (克 盆⁻¹)

Table 2 Effects of increased atmospheric NH₃ on biomass of NE5 and SD19 under various N supplies (g pot⁻¹)

基因型 Genotype	NH ₃ 浓度 NH ₃ concentration (nl L ⁻¹)	测定日期 Determination time								
		6 月 10 日 June 10			6 月 20 日 June 20			6 月 30 日 June 30		
		根系 Roots	茎叶 Shoots	总量 Total	根系 Roots	茎叶 Shoots	总量 Total	根系 Roots	茎叶 Shoots	总量 Total
高供氮介质 High N medium										
NE5	10	0.15 ^a	0.44 ^a	0.59 ^a	5.75 ^a	9.49 ^a	15.24 ^a	50.90 ^a	246.36 ^a	297.26 ^a
SD19	10	0.24 ^b	0.65 ^b	0.89 ^b	5.97 ^b	12.4 ^b	18.37 ^b	34.82 ^b	194.55 ^b	229.37 ^b
NE5	1 000	0.14 ^a	0.36 ^a	0.50 ^a	5.44 ^a	8.83 ^a	14.27 ^a	44.26 ^a	207.33 ^a	251.59 ^a
SD19	1 000	0.22 ^b	0.61 ^b	0.83 ^b	5.61 ^b	11.7 ^b	17.31 ^b	24.12 ^b	164.53 ^b	188.65 ^b
低供氮介质 Low N medium										
NE5	10	0.19 ^a	0.46 ^a	0.65 ^a	6.33 ^a	10.04 ^a	16.37 ^a	36.8 ^a	147.74 ^a	184.54 ^a
SD19	10	0.17 ^b	0.34 ^b	0.51 ^b	5.89 ^b	9.62 ^a	15.51 ^a	37.3 ^a	125.50 ^b	162.80 ^b
NE5	1 000	0.21 ^a	0.50 ^a	0.71 ^a	6.67 ^a	11.60 ^a	18.27 ^a	39.5 ^a	156.16 ^a	195.66 ^a
SD19	1 000	0.19 ^b	0.43 ^b	0.62 ^b	6.22 ^b	9.80 ^b	16.02 ^b	44.8 ^b	134.83 ^b	179.63 ^b

表注同表 1 Notes see Table 1

表 3 不同供氮介质下 NH₃ 浓度升高对‘氮高效 5 号’ (NE5) 和‘氮低效四单’ (SD19) 根冠比的影响

Table 3 Effects of increased atmospheric NH₃ on ratio of roots and shoots of NE5 and SD19 under various N supplies

基因型 Genotype	NH ₃ 浓度 NH ₃ concentration (nl L ⁻¹)	根冠比 Ratio of roots and shoots							
		高供氮介质 High N medium				低供氮介质 Low N medium			
		6 月 10 日 June 10	6 月 20 日 June 20	6 月 30 日 June 30	平均 Average	6 月 10 日 June 10	6 月 20 日 June 20	6 月 30 日 June 30	平均 Average
NE5	10	0.37	0.61	0.20	0.39 ^a	0.42	0.63	0.24	0.43 ^a
SD19	10	0.36	0.44	0.18	0.33 ^b	0.49	0.61	0.30	0.47 ^a
NE5	1 000	0.40	0.62	0.21	0.41 ^a	0.42	0.58	0.23	0.42 ^a
SD19	1 000	0.36	0.44	0.15	0.32 ^b	0.44	0.63	0.33	0.47 ^a

表注同表 1 Notes see Table 1

统计分析结果表明(表 4),大气 NH₃ 浓度与供氮介质对根冠比和 SPAD 值的影响有极显著交互作用 ($p < 0.001$);而对 P_n 和 G_s 的影响不存在交互作用。供氮介质和基因型对根冠比、P_n 和 G_s 有极显著或显著的交互作用 ($p < 0.001$ 或 $p < 0.05$),而对 SPAD 值没有影响;而大气 NH₃ 浓度和基因型对各个生理指标均没有显著交互作用。大气 NH₃、介质供氮和基因型对 P_n 和 G_s 的影响存在极显著交互作用 ($p < 0.01$),但对根冠比和 SPAD 值不存在交互

作用。

由前述分析可知,与高供氮介质相比,低供氮介质下大气 NH₃ 浓度增高,两种氮效率玉米基因型的 SPAD 值和根冠比较高,说明植物从大气中吸收 NH₃ 有利于改善生长在低供氮介质中作物的氮素营养状况;而对生长在高供氮介质中作物生长具有一定程度的抑制作用。在高供氮介质下,NE5 的 P_n、G_s 和根冠比明显高于 SD19,而在低供氮介质下结果相反。

表 4 供氮介质、大气 NH₃ 浓度及其基因型对 SPAD 值、P_n、G_s 和根冠比影响交互作用的显著性检验

Table 4 Different significance test for interaction between NH₃ concentration, supplying N and genotype on SPAD value, P_n, G_s and R/C

	p 值 p value			
	NH ₃ × N	NH ₃ × G	N × G	NH ₃ × N × G
SPAD 值 SPAD value	< 0.001	0.583	0.882	0.586
P _n (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	0.097	0.600	0.029	0.009
G _s (mmol m ⁻² s ⁻¹)	0.097	0.600	0.029	0.009
根冠比 Ratio of roots to shoots (R/C)	< 0.001	0.871	< 0.001	0.184

G: 基因型 Genotype NH₃: 大气 NH₃ 浓度 NH₃ concentration 显著 Significance: $p < 0.05$ 极显著 Significance markedly: $p < 0.01$ 不显著 No significance: $p > 0.05$

3 讨论

NH₃ 浓度升高对玉米光合作用及其生长影响的研究,在以前研究相对较少。植物在吸收 NH₃ 的同时又向空气中释放 NH₃,其收支平衡取决于大气中 NH₃ 浓度和 NH₃ 补偿点的高低,一般认为在生育前期,特别是当生长介质供氮较低,而大气 NH₃ 浓度高于补偿点时,表现为净吸收。本试验结果表明,大气 NH₃ 升高对玉米净光合速率及生物量有显著影响 ($p < 0.05$),其影响程度与供氮介质水平有关,低供氮介质下表现为促进,而高供氮介质下为抑制,较高的大气 NH₃ 浓度对高供氮介质上生长的作物在一定程度上产生抑制效果,但机理还不清楚。

本研究发现,大气 NH₃ 浓度升高对净光合速率 P_n 和气孔导度 G_s 有极显著或显著影响 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。NH₃ 吸收主要通过气孔进行,其吸收量和吸收速率取决于气孔导度。Husted 和 Schjoerring (1996) 研究发现,在空气相对湿度较高,光照较强时,植物气孔导度增加,从而增加对大气 NH₃ 的吸收。对杨树植物用 64 mol m⁻³ NH₃ 处理后发现,该处理会导致光合与气孔导度均增加,并发现气孔导度与 NH₃ 的吸收具相关性 (Pearson & Stewart, 1993)。van Hove 等 (1991) 用气室法研究表明,长期暴露在 64 μg NH₃ 空气中的白杨叶片,能够增加 CO₂

同化速率。van der Eerden 和 Pérez-Soba (1992) 的研究也表明,当大气 NH₃ 浓度较高时,通过诱导植物叶片气孔开放,增加酶活性,从而增加对 CO₂ 的吸收和同化。

两种氮效率玉米基因型在不同供氮介质下的 SPAD、P_n、G_s、生物总量和根冠比存在显著差异。与高供氮介质相比,低供氮介质下 NH₃ 浓度增加导致两种不同氮效率玉米基因型的 SPAD 值、P_n、G_s、生物总量和根冠比增加,说明植物从大气中吸收 NH₃ 有利于改善生长在低供氮介质上作物的氮素营养状况;而对生长在高供氮介质上的作物产生一定程度的抑制作用,Lockyer 和 Whitehead (1986) 研究发现,暴露于 1 000 nl L⁻¹ NH₃ 浓度下的黑麦草 (*Lolium* spp.) 相对生长速率 (RGR) 显著提高。显然,本研究结果在低供氮介质条件下,与 Lockyer 和 Whitehead (1986) 的研究结果相同;在高供氮介质条件下,与其相反,可见大气 NH₃ 的营养效果与介质供氮情况密切相关。统计检验进一步发现,大气 NH₃ 浓度和供氮介质水平对 SPAD 值和根冠比有极显著的交互作用(表 4),高供氮介质下大气 NH₃ 浓度对 SPAD 值和根冠比表现为抑制,而低供氮介质下为促进,这可能与植物冠层从大气中吸收大量 NH₃ 后,会对同化产物的形成、分配、养分利用效率等产生影响,更清楚的影响机理有待于进一步取证。因此,随着大气 NH₃ 浓度的提高,将可能对低供氮介质上作物的

光合作用带来有利影响;或者在大气 NH₃ 浓度较高的地区,可通过适当降低施氮量和选择不同基因型而增加植物对大气 NH₃ 的吸收利用。

参 考 文 献

- Beat H, Albrecht N (2002). Ammonia exchange with grasslands. *Agrarforschung*, 9, 280 - 285.
- Dueck ThA, Doré FG, ter Horst R, van der Eerden LJ (1990). Effects of ammonia, ammonium sulphate and sulphur dioxide on the frost sensitivity of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Water, Air, & Soil Pollution*, 54, 33 - 49.
- Fangmeier A, Hadwiger-Fangmeier A, van der Eerden LJ (1994). Effects of atmospheric ammonia on vegetation—a review. *Environmental Pollution*, 86, 43 - 82.
- Hanstein S, Mattsson M, Jaeger HJ (1999). Uptake and utilization of atmospheric ammonia in three native Poaceae species: leaf conductance, composition of apoplastic solution and interactions with root nitrogen supply. *New Phytologist*, 141, 71 - 83.
- Hegg DA, Radke LF, Hobbs PV (1990). Emissions of some trace gases from biomass fires. *Journal of Geophysical Research*, 95, 560 - 567.
- Husted S, Schjoerring J K (1996). Ammonia flux between oilseed rape plant and the atmosphere in response to changes in leaf temperature, light intensity, and air humidity. *Plant Physiology*, 112, 67 - 74.
- Krupa SV (2003). Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution*, 124, 179 - 221.
- Li SX (李生秀), Li ZR (李宗让), Tian XH (田霄鸿), Wang ZH (王朝辉) (1995). Nitrogen loss from above-ground plants by volatilization. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences* (植物营养与肥料学报), 1(2), 18 - 25. (in Chinese with English abstract)
- Li SQ (李世清), Zhao L (赵琳), Shao MA (邵明安), Zhang XC (张兴昌), Shangguan ZP (上官周平) (2004). Ammonia exchange between plant canopy and the atmosphere—a review. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 24, 2154 - 2162. (in Chinese with English abstract)
- Lockyer DR, Whitehead DC (1986). The uptake of gaseous ammonia by the leaves of Italian ryegrass. *Journal of Experimental Botany*, 37, 919 - 927.
- Mengel K, Kirkby EA (1987). *Principles of Plant Nutrition*. International Potash Institute, Bern, Switzerland, 347 - 384.
- Nadelhoffer KJ, Emmett BA, Gundersen P (1999). Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature*, 398, 145 - 147.
- O Deen WA, Porter LK (1986). Continuous flow system for collecting volatile ammonia and amines from senescing winter wheat. *Agronomy Journal*, 78, 746 - 749.
- Pearson J, Stewart GR (1993). The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. *New Phytologist*, 125, 283 - 305.
- Peng S, Garcia FV, Laza RC (1993). Adjustments for specific leaf weight improve chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*, 85, 987 - 990.
- Pérez-Soba M, van der Eerden LJM (1993). Nitrogen uptake in needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) when exposed to gaseous ammonia and ammonium fertilizer in the soil. *Plant and Soil*, 153, 231 - 242.
- Schjoerring J K, Poulsen MM, Husted S (1998). Soil-plant-atmosphere ammonia exchange associated with *Calluna vulgaris* and *Deschampsia flexuosa*. *Atmospheric Environment*, 32, 507 - 512.
- van der Eerden LJM, Pérez-Soba M (1992). Physiological responses of *Pinus sylvestris* to atmospheric ammonia. *Trees*, 6, 48 - 53.
- van Hove LWA, Van Kooten O, Van Wijk KJ, Vredenberg WJ, Aderna EH, Pieters GA (1991). Physiological effects of long term exposure to low concentrations of SO₂ and NH₃ on poplar leaves. *Physiologia Plantarum*, 82, 32 - 40.
- Wedin DA, Tilman D (1996). Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grasslands. *Science*, 274, 1720 - 1723.
- Wang ZH (王朝辉), Tian XH (田霄鸿), Li SX (李生秀) (2001). Nitrogen losses from winter wheat plant by NH₃ volatilization in late growing stage. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 27, 1 - 6. (in Chinese with English abstract)
- Yin B, Shen RF, Zhu ZL (1996). Use of new water soluble film forming material to ammonia loss from water solution. *Pedosphere*, 6, 329 - 334.
- Zhao P (赵平), Sun GC (孙谷畴), Zeng XP (曾小平), Cai XA (蔡锡安), Peng SL (彭少麟) (2003). Variations of photosynthetic parameters in leaves of acacia auriculataefornis grown in different nitrogen sources under increased atmospheric NH₃. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 1386 - 1394. (in English with Chinese abstract)

责任编辑: 李凤民 责任编辑: 刘丽娟