

DOI: 10.5846/stxb201403210510

刘庆倩, 石婕, 安海龙, 曹学慧, 刘超, 尹伟伦, 夏新莉, 郭惠红. 应用¹⁵N 示踪研究欧美杨对 PM_{2.5} 无机成分 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收与分配. 生态学报, 2015, 35(19): - .

Liu Q Q, Shi J, An H L, Cao X H, Liu C, Yin W L, Xia X L, Guo H H. Absorption and Distribution of PM_{2.5} NH₄⁺ and NO₃⁻ in *Populus euramericana* Neva. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): - .

应用¹⁵N 示踪研究欧美杨对 PM_{2.5} 无机成分 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收与分配

刘庆倩, 石 婕, 安海龙, 曹学慧, 刘 超, 尹伟伦, 夏新莉, 郭惠红*

北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083

摘要:通过气溶胶发生系统模拟 PM_{2.5} 颗粒的发生, 运用¹⁵N 示踪技术研究了欧美杨 107 (*Populus euramericana* Neva.) 对 PM_{2.5} 中水溶性无机成分 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收与分配规律。结果表明, 欧美杨能够有效吸收 PM_{2.5} 中的 NH₄⁺ 和 NO₃⁻。轻度和重度污染下, 欧美杨叶片对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收速率均于处理后第 1 天达到峰值, 之后, 轻度污染下对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收速率迅速降低以后趋于稳定, 而重度污染下对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收速率缓慢下降至趋于稳定。轻度污染下的欧美杨叶片的¹⁵N 含量在处理第 1 天达到峰值,¹⁵N(NH₄⁺) 的含量为 0.11 mg/g, 干重,¹⁵N(NO₃⁻) 的为 0.14 mg/g, 干重, 之后¹⁵N 含量迅速下降至趋于稳定。重度污染下的叶片¹⁵N 含量在处理第 1 天迅速增长, 之后缓慢增长至处理后第 7 天达到最高值,¹⁵N(NH₄⁺) 的含量为 0.11 mg/g, 干重,¹⁵N(NO₃⁻) 的为 0.13 mg/g, 干重。处理 7 d 后, 欧美杨不同组织器官吸收或通过再分配获取的¹⁵N 含量存在差异。轻度污染下, 细根对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收量最高, 树皮、叶柄、叶片次之, 髓最低。而重度污染下, 叶片对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的吸收量最高, 细根、叶柄、树皮次之, 髓最低。欧美杨各组织器官中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 的含量均表现为重度污染大于轻度污染, 且两种污染程度下的欧美杨各组织器官对 NO₃⁻ 的吸收均大于对 NH₄⁺ 的吸收。重度污染下, 欧美杨茎木质部对¹⁵N(NH₄⁺ 和 NO₃⁻) 的吸收征调能力 (N_{dff}, Nitrogen derived from fertilizer) 最大, 其次为髓, 叶片最小; 欧美杨各组织器官中的¹⁵N 分配率表现为叶片>细根>叶柄>树皮>粗根>茎木质部>髓。本研究结果对进一步揭示植物吸收 PM_{2.5} 的机制及有效利用植物降低颗粒物污染、净化环境提供了重要的科学理论依据。

关键词:欧美杨; ¹⁵N 示踪; PM_{2.5}; NH₄⁺; NO₃⁻; 吸收; 分配

Absorption and Distribution of PM_{2.5} NH₄⁺ and NO₃⁻ in *Populus euramericana* Neva.

LIU Qingqian, SHI Jie, AN Hailong, CAO Xuehui, LIU Chao, YIN Weilun, XIA Xinli, GUO Huihong*

College of Biological Science and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: PM_{2.5} particles, with a diameter of 2.5 μm or less, are the primary pollutant in the air. In this study, PM_{2.5} particles were generated with an aerosol generator, and absorption of NH₄⁺ and NO₃⁻ in PM_{2.5} and their distribution in *Populus euramericana* seedlings were studied using ¹⁵N tracing techniques. The results showed that water-soluble inorganic components (NH₄⁺ and NO₃⁻) in PM_{2.5} can be absorbed effectively by *P. euramericana*. Absorption rates of NH₄⁺ and NO₃⁻ by *P. euramericana* leaves peaked one day after treatment, in both low and severe pollution treatments. Subsequently, the absorption rates of NH₄⁺ and NO₃⁻ in the low pollution treatment decreased rapidly and then leveled off, while the absorption

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201304301)

收稿日期: 2014-03-21; 网络出版日期: 2014-12-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guohh@bjfu.edu.cn

rates in the severe pollution treatment decreased slowly to a stable level. At the low pollution level, ^{15}N content of *P. euramericana* leaves peaked one day after treatment, when $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ content was 0.11 mg/g and that of $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ was 0.14 mg/g, DW. Following this peak, ^{15}N content decreased rapidly and remained relatively steady. At the severe pollution level, ^{15}N content of *P. euramericana* leaves increased quickly in the first day of treatment before increasing slowly to reach its maximum 7 days after treatment, when $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ content was 0.11 mg/g and that of $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ was 0.13 mg/g, DW. ^{15}N content differed among tissues and organs of *P. euramericana* 7 days after treatment. In the low pollution treatment, NH_4^+ and NO_3^- content was highest in fine roots, followed by that in bark, petiole and leaf, with the lowest content in pith. However, in the severe pollution treatment, NH_4^+ and NO_3^- content in various tissues and organs was ranked as leaf > fine root > petiole > bark > pith. The NH_4^+ and NO_3^- content of all tissues and organs of *P. euramericana* in the severe pollution treatment were higher than those in the low pollution treatment. Moreover, more NO_3^- was absorbed by *P. euramericana* than NH_4^+ in both low and severe pollution treatments, which correlated well with NH_4^+ and NO_3^- absorption rates and contents in leaves two days after treatment. In the severe pollution treatment, the Ndff value was highest in xylem (stem), followed by that in pith, and the lowest value was in leaf. The ^{15}N partition rate of different tissues and organs was leaf > fine root > petiole > bark > coarse root > xylem (stem) > pith. Our results provide a basis for further research to elucidate the mechanism of $\text{PM}_{2.5}$ absorption by plants and develop strategies to reduce particulate matter pollution using plants.

Key Words: *Populus euramericana* Neva.; ^{15}N tracing; $\text{PM}_{2.5}$; NH_4^+ ; NO_3^- ; Absorption; Distribution

工业化和城市化的迅猛发展使得大气颗粒物污染愈发严重。大气中的颗粒物可以降低能见度、影响气候变化^[1-2],还会影响人及其它生物的生命健康,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 因其粒径小、易富集有毒有害物质、可直接经由呼吸进入人的肺泡和血液等特点,极易诱发呼吸系统疾病甚至死亡^[3],已经成为国际社会和人民群众关注的焦点。

$\text{PM}_{2.5}$ 由直接排入空气中的一次颗粒物和空气中的气态污染物通过化学反应生成的二次颗粒物组成。二次颗粒物主要由铵盐和硝酸盐组成,比如 NO_x 经过大气化学反应生成二次铵盐和硝酸盐,存在于大气环境中^[4]。研究显示,水溶性无机盐是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分,对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的贡献率达 40% 以上,其中 NH_4^+ 和 NO_3^- 为水溶性无机盐的主要离子^[5-6]。研究表明, $\text{PM}_{2.5}$ 中亲水性较强的 NH_4^+ 和 NO_3^- 对散射系数影响较大,是 $\text{PM}_{2.5}$ 中影响能见度的主要因子^[7]。 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 等水溶性无机离子浓度过高也会对人体健康如肺功能产生直接影响^[8]。因此,寻求高效合理的方法消除大气中的 $\text{PM}_{2.5}$,降低大气颗粒物浓度,对改善空气质量具有重要的意义。

植物作为改善环境的天然净化器,能有效阻滞、吸附空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物,在改善空气质量方面起着主导作用^[9-10]。植物的滞尘能力与其叶片形态及叶表特征密切相关,表面粗糙、有绒毛或能够分泌黏液的叶片更容易吸附大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物^[11]。但之前的研究大多集中于植物叶片和枝干对大气中颗粒物的粘附与滞留,对植物是否能够直接吸收大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物,若能吸收其吸收及分配机制又是什么还未见研究。本研究借助稳定同位素 ^{15}N 示踪技术,以常用行道绿化树种欧美杨为研究对象,研究了其对 $\text{PM}_{2.5}$ 无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收与分配规律,以期利用植物吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气颗粒物,净化空气的理论提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为长势一致的欧美杨 107 (*Populus euramericana* Neva.) 扦插苗,平均株高 83 cm,平均基径 0.88 cm,每株叶片数目 20 片左右。2013 年 4 月中旬扦插,8 月中旬取材。供试材料共 5 组(4 个处理组,1 个对照组),每组 3 株。

1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 发生装置

气溶胶发生系统可产生固态气溶胶,是校准大气颗粒物测定的有效工具^[12]。本研究利用气溶胶发生系统将实验溶液形成直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的微粒,模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒。

将 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 和 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ (购自上海化工研究院,丰度为 10%)分别配制成 2 g/L 的溶液,以稳定的流速加入气溶胶发生器(TSI3076,台湾章嘉企业有限公司)。当植物生长室(100 cm×50 cm×100 cm)的气溶胶颗粒浓度达到所需实验浓度后,将欧美杨放入植物生长室,并通过调节流量计流速来维持实验浓度,每天处理 2 h,处理完毕后将植物移出植物生长室,共处理 7 d。植物生长室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度通过 Dustmate (DM1781, Turnkey Instruments Ltd Northwich England)测定获得。 $\text{PM}_{2.5}$ 发生装置参照麦华俊等^[12]的方法加以改进,如图 1 所示。

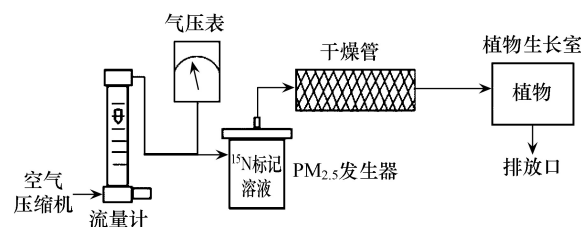


图 1 $\text{PM}_{2.5}$ 发生装置示意图

Fig.1 Illustration of the $\text{PM}_{2.5}$ generation system

1.3 ^{15}N 同位素处理方法

当植物生长室内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到实验要求后,将欧美杨植株放入植物生长室。放入前花盆上口用保鲜膜严密覆盖,以避免室内空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 与土壤接触。实验分三组:

$^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 处理:设置轻度污染浓度($100\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)和重度污染浓度($200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)两个浓度梯度,每个浓度梯度设 3 个重复。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度梯度的设置根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)。

$\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 处理: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度设置同上,每个浓度梯度设 3 个重复。

对照组:与处理组同时进行,不做通气处理。目的是与 $\text{PM}_{2.5}$ 处理的植株进行对照分析。

处理于每天上午 10:00—12:00 进行,实验周期为 1 周。

1.4 样品处理与测定指标

在处理前及处理后的 1—6 天,每组样品于每日上午 10:00 分别从植株顶端向下第 7 片功能叶开始取样,每天取 1 片,共取 6 片。叶片按清水→洗涤剂→清水→1%盐酸→3 次去离子水顺序冲洗后,于 $105\ ^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min,随后在 $80\ ^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重,电磨粉碎后过 60 目筛混匀。样品送至中国科学院植物研究所生态与环境科学稳定同位素实验室,采用同位素比率质谱仪(型号为 DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, Inc., USA)测定 ^{15}N 丰度和全氮含量(N%)。

处理 7 天后(第 7 天处理的次日,即第 8 天),上午 10:00 整株收获欧美杨植株。单株样品解析为叶片、叶柄、树皮、木质部(茎)、髓(茎)、粗根($\geq 2\ \text{mm}$)、细根($< 2\ \text{mm}$),按上述方法测定各组织器官 ^{15}N 丰度和全氮含量(N%)。

有关计算公式^[13]为:

$$\text{Ndff}(\%) = [\text{样品中的 } ^{15}\text{N} \text{ 丰度}(\%) - \text{自然丰度}(0.365\%)] / [\text{标记物中的 } ^{15}\text{N} \text{ 丰度}(\%) - \text{自然丰度}(0.365\%)] \times 100;$$

$$^{15}\text{N} \text{ 吸收量}(\text{mg/g, 干重}) = \text{全氮含量}(\text{mg/g, 干重}) \times \text{Ndff}(\%)$$

$$^{15}\text{N} \text{ 分配率}(\%) = \text{各组织器官从标记物中吸收的 } ^{15}\text{N} \text{ 量}(\text{mg/g, 干重}) / \text{植株总吸收 } ^{15}\text{N} \text{ 量}(\text{mg/g, 干重}) \times 100$$

实验数据采用 SPSS 20.0 软件进行差异显著性分析,应用 Microsoft Excel 2007 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同处理条件下欧美杨叶片 ^{15}N 吸收速率和 ^{15}N 含量的动态变化

在轻度和重度污染处理初期,欧美杨叶片均可快速吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 和 NO_3^- (图 2)。处理后第 1 天,不同处理条件下欧美杨叶片的 ^{15}N 吸收速率均达到峰值,但欧美杨叶片对 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的吸收速率均大于 $^{15}\text{NH}_4^+$ 。轻度

污染处理下,欧美杨叶片对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的最大吸收速率为 $0.135 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$,对 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的最大吸收速率为 $0.114 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$,对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的最大吸收速率约为 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的1.2倍;重度污染处理下,欧美杨叶片对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的最大吸收速率为 $0.077 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$,对 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的最大吸收速率为 $0.058 \text{ mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$,对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的最大吸收速率约为 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的1.3倍。在处理1天内,两种轻度标记物处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 吸收速率均大于两种重度处理,但处理1天后,两种轻度处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 吸收速率迅速下降,至处理第2天时 ^{15}N 吸收速率已小于重度处理,之后继续缓慢下降。两种重度处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 吸收速率在处理1天后逐渐下降,处理第2天至处理末期逐渐趋于稳定,且均大于轻度处理的 ^{15}N 吸收速率。在处理结束后,轻度污染条件下欧美杨叶片对 $^{15}\text{NH}_4^+$ 和 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的吸收速率无显著差异,而重度污染条件下欧美杨叶片对 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的吸收速率仍大于 $^{15}\text{NH}_4^+$ 。

在不同污染处理的第1天,欧美杨叶片的 ^{15}N 含量均显著升高(图3),说明欧美杨叶片可快速吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 和 NO_3^- 。轻度污染处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 含量均在处理第1天时达到峰值, $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的含量为 0.11 mg/g ,干重, $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的含量为 0.14 mg/g ,干重。然后,随吸收速率的迅速下降,处理后1—3天 ^{15}N 含量显著降低,3—7天先上升后又略有下降,至处理第7天时,欧美杨叶片的 ^{15}N 含量分别降至 0.045 mg/g ,干重($^{15}\text{NH}_4^+$ 处理)和 0.047 mg/g ,干重($^{15}\text{NO}_3^-$ 处理),与处理第1天相比,分别下降了59.1%和66.4%。重度污染处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 含量在处理第1天显著增长,之后,随吸收速率的缓慢降低增长趋势变缓,略有波动。在处理第7天,欧美杨叶片吸收的 ^{15}N 含量达到最高值,重度 $^{15}\text{NH}_4^+$ 处理的为 0.11 mg/g ,干重,重度 $^{15}\text{NO}_3^-$ 处理的为 0.13 mg/g ,干重。处理2天以后,重度处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 含量均大于轻度处理,说明欧美杨叶片对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收含量在一定浓度范围内随浓度升高而增大。轻度和重度污染条件下, $^{15}\text{NO}_3^-$ 处理的欧美杨叶片的 ^{15}N 含量均大于 $^{15}\text{NH}_4^+$ 处理,这说明欧美杨叶片更易于吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NO_3^- 。

2.2 欧美杨不同组织器官对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收与分配

2.2.1 不同处理条件下欧美杨不同组织器官中的 ^{15}N 含量(mg/g ,干重)

处理7天后,处理组欧美杨各组织器官的 ^{15}N 含量均显著大于对照,说明欧美杨各组织器官均能吸收或通过再分配获取 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 和 NO_3^- (图4)。轻度和重度污染下,欧美杨不同组织器官中 ^{15}N 含量均有不同程度的差异。轻度污染下,细根的 ^{15}N 含量最高,树皮、叶柄、叶片次之,髓最低。其中 $^{15}\text{NH}_4^+$ 处理的细根与叶柄、髓差异显著,与树皮、叶片差异不显著; $^{15}\text{NO}_3^-$ 处理的细根、树皮、叶柄、叶片间差异不显著,细根、叶柄与髓均

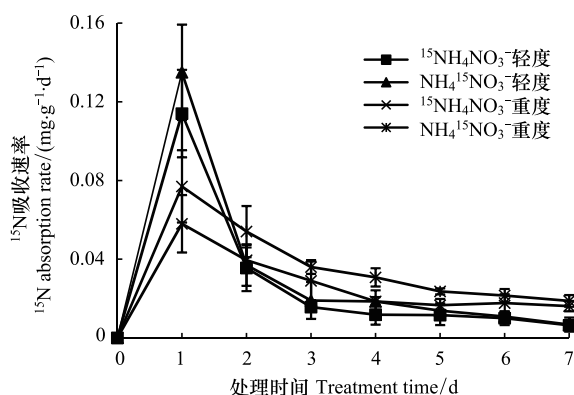


图2 不同处理条件下欧美杨叶片 ^{15}N 吸收速率($\text{mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$)的动态变化

Fig.2 Dynamics of ^{15}N absorption rate ($\text{mg g}^{-1} \text{ d}^{-1}$) in *P. euramericana* leaves under different treatments

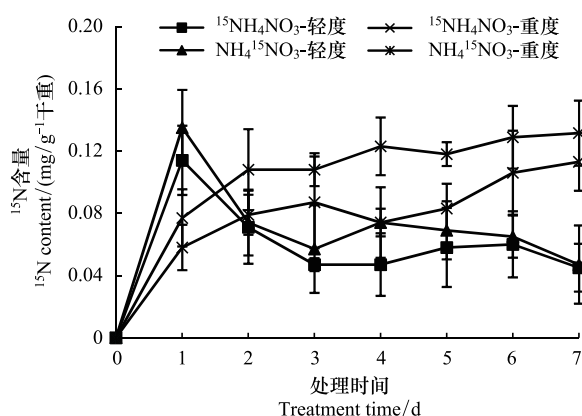


图3 不同处理条件下欧美杨叶片 ^{15}N 含量(mg/g ,干重)的动态变化

Fig.3 Dynamics of ^{15}N content (mg/g , DW) in *P. euramericana* leaves under different treatments

差异显著。而重度污染下,叶片的 ^{15}N 含量最高,细根、叶柄、树皮次之,髓最低。其中 $^{15}\text{NH}_4^+$ 处理的叶片、细根、叶柄、树皮间无显著差异,四者与髓均有显著差异; $^{15}\text{NO}_3^-$ 处理的叶片、细根、叶柄间无显著差异,三者与髓均有显著差异。从图4还可得知,欧美杨各组织器官的 ^{15}N 含量均显示重度污染处理大于轻度污染处理,且轻度和重度污染下的欧美杨各组织器官对 NO_3^- 的吸收量均大于 NH_4^+ 。这与欧美杨叶片对 ^{15}N 的吸收规律(图3)一致。重度污染下,叶片对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的吸收量为 0.131 mg/g ,干重,对 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的吸收量为 0.113 mg/g ,干重,对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的吸收量为对 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 吸收量的1.2倍;细根对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的吸收量为 0.126 mg/g ,干重,对 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 的吸收量为 0.097 mg/g ,干重,对 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的吸收量为对 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 吸收量的1.3倍。

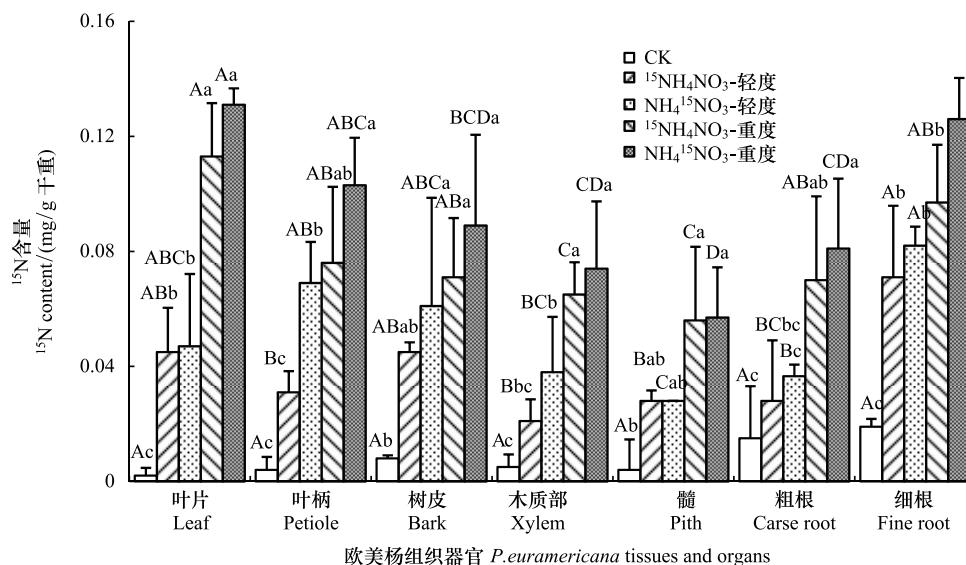


图4 处理7天后不同处理条件下欧美杨组织器官中的 ^{15}N 含量(mg/g ,干重)

Fig.4 ^{15}N content (mg/g , DW) of *P. euramericana* tissues and organs 7 days after different treatments

误差线表示标准差,不同字母表示差异性显著($P < 0.05$),相同字母表示差异性不显著($P \geq 0.05$),小写字母代表同一器官不同处理间的差异性,大写字母代表同一处理不同器官间的差异性

2.2.2 不同处理条件下欧美杨不同组织器官的 Ndff (%) 和 ^{15}N 分配率 (%)

Ndff 指植株器官从标记物中吸收分配到的 ^{15}N 量对该器官全氮量的贡献率,它反映了植株器官对 ^{15}N 的吸收征调能力^[14]。从表1可见,轻度污染条件下,欧美杨不同组织器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力无明显规律,但叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力最小。重度污染条件下,欧美杨各组织器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力均为木质部最大,其次为髓,叶片最小,木质部的 Ndff 值约为叶片的4倍。轻度和重度污染下,除髓外,欧美杨各组织器官均表现为对 NO_3^- 的吸收征调能力大于 NH_4^+ 。

植株组织器官中 ^{15}N 占全株 ^{15}N 总量的百分率反映了标记物在植株体内的分布及在各组织器官迁移分配的规律^[15]。从表1可以看出,轻度污染条件下欧美杨各组织器官的 ^{15}N 分配率亦无明显规律,但表现为细根的 ^{15}N 分配率最大。重度污染下,欧美杨各组织器官的 ^{15}N 分配率表现为叶片>细根>叶柄>树皮>粗根>木质部>髓。叶片中 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 和 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 的分配率分别为21.07%和20.33%,分别为髓中 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 和 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 分配率的2.09倍和2.42倍。可见,叶片是欧美杨吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 的最主要器官,细根是除叶片之外吸收累积 $^{15}\text{N}(\text{NH}_4^+)$ 和 $^{15}\text{N}(\text{NO}_3^-)$ 最多的器官。

3 讨论

目前,虽有相关研究证实植物能够阻滞、吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物^[8-9],但对植物是否可以吸收并分配 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物并无研究。本研究通过气溶胶发生系统模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 发生研究欧美杨对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收与分

配,发现与对照相比,处理植株体内的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量均有显著增加,证实了植物能够吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物。虽然模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物处理植株检测到的 NH_4^+ 和 NO_3^- 的含量与通过叶面喷洒或涂抹处理植株后的含量相比较低^[16-17],但模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物更能真实地反映植物对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸收能力,有利于揭示植物对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物主要成分的吸收和分配机制。

表 1 处理 7 天后不同处理条件下欧美杨组织器官的 Ndff(%) 和 ^{15}N 分配率(%)

Table 1 Ndff(%) and ^{15}N partition rate (%) of *P. euramericana* tissues and organs 7 days after different treatments

测定项目 Determined items	处理 Treatment	叶片 Leaf	叶柄 Petiole	树皮 Bark	木质部 Xylem	髓 Pith	粗根 Coarse root	细根 Fine root
Ndff(%)	I	0.34±0.10Cb	1.00±0.30Bb	1.03±0.12Bb	0.74±0.17BCb	1.83±0.12Ab	1.10±0.32Bb	1.07±0.35Ba
	II	0.97±0.12Ca	2.15±0.45Aa	1.31±0.27BCab	1.33±0.28BCb	1.63±0.15ABb	1.24±0.40BCb	1.53±0.35BCa
	III	0.85±0.25Ea	1.93±0.35BCa	1.56±0.38CDab	3.35±0.14Aa	3.03±0.30Aa	2.18±0.50Ba	1.31±0.18DEa
	IV	0.86±0.14Fa	2.49±0.42BCa	1.80±0.36DEa	3.50±0.53Aa	2.98±0.23ABa	2.20±0.14CDa	1.41±0.17EFa
^{15}N 分配率/% ^{15}N Partition rate	I	17.48±3.39BCab	11.78±3.99BCDb	16.85±1.55Ba	7.57±2.07Da	10.56±1.60CDa	10.00±0.45CDa	25.76±4.58Aa
	II	12.05±4.65CDb	19.49±2.27ABa	15.73±4.75BCa	9.95±3.47CDa	8.17±2.29Da	10.65±3.20CDa	23.96±4.02Aa
	III	21.07±1.90Aa	13.65±3.14BCb	12.84±2.23BCa	11.92±2.48BCa	10.08±4.56Ca	12.55±3.75BCa	17.89±4.70ABa
	IV	20.33±4.18Aa	15.65±0.49BCab	13.16±2.51CDa	11.06±1.68DEa	8.40±1.24Ea	12.10±1.62CDEa	19.30±2.39ABa

Ndff: Nitrogen derived from fertilizer(氮素分配率)

处理 I: $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ -轻度;处理 II: $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ -轻度;处理 III: $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ -重度;处理 IV: $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ -重度

本研究发现,不同污染程度下欧美杨叶片对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收规律存在差异。轻度污染下的欧美杨叶片吸收的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量在处理第 1 天表现出迅速增加以后,随后减少,可能是随着 ^{15}N 吸收速率的显著下降,欧美杨叶片分配至其它各组织器官的 ^{15}N 含量大于从标记物中吸收的 ^{15}N 含量所致,处理 3 天以后,欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收和外运趋于平衡。而重度污染下的欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收量在处理第 1 天迅速增加,之后呈缓慢增长趋势,可能是由于在此期间 ^{15}N 吸收速率下降的缓慢,叶片从标记物中吸收的 ^{15}N 含量大于向其他各组织器官的输出。还可能是由于轻度和重度污染下,植物对 N 吸收具有不同的平衡点所致。关于轻度和重度污染处理后期欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收速率均较低,可能是由于前期植物对 ^{15}N 产生的短期激发效应,也可能是随处理时间的延长,欧美杨叶片表面累积的 $\text{PM}_{2.5}$ 增多,影响了欧美杨对 $\text{PM}_{2.5}$ 的进一步吸收。可以推测,自然条件下,经过雨水冲洗,减小 $\text{PM}_{2.5}$ 在叶片上的分布密度, $\text{PM}_{2.5}$ 被叶片吸收的速率又会有所上升。有研究表明,植物对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收具有明显的偏好性^[18]。在本研究中,与 NH_4^+ 相比,欧美杨叶片(处理 2 天后)及其它组织器官对 $\text{PM}_{2.5}$ 成分中的 NO_3^- 表现出更强的吸收和分配能力,这与田东梅等^[19]对欧美杨不同土施氮源吸收的研究结果相一致。 NO_3^- 被植物吸收后需先还原成 NH_4^+ 才能进入后续代谢过程,因此 NO_3^- 易于在细胞液泡内累积,而 NH_4^+ 是与 H^+ 进行交换吸收的,不易在细胞液泡中累积^[20-21],这可能是本研究欧美杨各组织器官对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NO_3^- 的吸收大于 NH_4^+ 的原因。

Ndff 和 ^{15}N 分配率能够反映植株组织器官对 ^{15}N 的吸收征调能力及 ^{15}N 标记物在植株体内的分布和迁移规律^[14-15]。本研究发现,在轻度污染条件下,欧美杨不同组织器官对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力(Ndff)及 ^{15}N 分配率均无明显规律,可能与轻度污染下 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度低有关。而重度污染条件下,欧美杨茎木质部对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力最大,其次为髓,叶片最小。这与潘中耀^[21]对橡胶树幼苗土施氮肥的研究结果基本一致。树干木质部和髓作为水溶性无机离子的主要运转通道及贮藏的“临时库”^[22],可能是欧美杨茎木质部和髓对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力较强的原因。董雯怡等^[23]在对毛白杨土施氮肥后发现,毛白杨各器官的 ^{15}N 分配率为叶>根>茎。本研究发现,重度污染条件下的欧美杨各组织器官的 ^{15}N 分配率表现为叶片>细根>叶柄>树皮>粗根>木质部>髓,这与前者的研究结果基本一致。叶片是植物吸收大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的最主要器官,其吸收的 ^{15}N (NH_4^+ 和 NO_3^-) 主要运输至根并在根中尤其是细根中以蛋白态形式储藏^[24],这可能是本研究中叶片和细根的 ^{15}N 分配率较高的原因。

4 结论

(1)不同 $\text{PM}_{2.5}$ 污染浓度下,欧美杨植株体内 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量均有增加,证实了植物能够吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物。

(2)轻度和重度污染下的欧美杨叶片均可快速吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 NH_4^+ 和 NO_3^- ,并均于处理后第 1 天达到峰值。然后,轻度污染下的欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收速率迅速降低以后趋于稳定,而重度污染下的欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收速率缓慢下降至趋于稳定。处理 1 天内,欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收速率均表现为轻度污染大于重度污染,处理第 2 天至结束,欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收速率均表现为重度污染大于轻度污染。整个处理期间,轻度和重度污染下的欧美杨叶片对 NO_3^- 的吸收速率均大于对 NH_4^+ 的吸收速率。

(3)轻度污染下,欧美杨叶片中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的含量于处理后第 1 天达到峰值,之后迅速下降,3 天以后虽略有波动但趋于稳定。而重度污染下,欧美杨叶片中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的含量在处理的第 1 天迅速增长,之后仍缓慢增长,并于处理后第 7 天达到最高值。在处理 2 天后,重度污染下的欧美杨叶片的 NH_4^+ 和 NO_3^- 的含量均大于轻度污染下的含量,且轻度和重度污染下,欧美杨叶片对 NO_3^- 的吸收量均大于对 NH_4^+ 的吸收量。

(4)轻度和重度污染下,欧美杨不同组织器官中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的含量均有不同程度的差异。轻度污染下,细根对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收量最高,树皮、叶柄、叶片次之,髓最低。而重度污染下,叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收量最高,细根、叶柄、树皮次之,髓最低。重度污染下欧美杨各组织器官中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的含量均大于轻度污染下的含量,且轻度和重度污染下,欧美杨各组织器官对 NO_3^- 的吸收量均大于对 NH_4^+ 的吸收量。这与欧美杨叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收规律一致。

(5)轻度污染下,欧美杨不同组织器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力(Ndff)及 ^{15}N 分配率均无明显规律。重度污染条件下,欧美杨茎木质部对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力最大,其次为髓,叶片最小。欧美杨各组织器官中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的分配率表现为叶片>细根>叶柄>树皮>粗根>木质部>髓。

(6)通过气溶胶发生系统模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的发生,借助 ^{15}N 示踪技术,研究结果显示了欧美杨对 $\text{PM}_{2.5}$ 无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收与分配规律,对进一步揭示植物吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 的机制及有效利用植物降低颗粒物污染、净化环境提供了重要的科学理论依据。

参考文献(References):

- [1] 刘爱霞,韩素芹,蔡子颖,张敏,李向津. 天津地区能见度变化特征及影响因素研究. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1847-1850.
- [2] Keim B D, Meeker L D, Slater J F. Manual synoptic climate classification for the East Coast of New England (USA) with an application to $\text{PM}_{2.5}$ concentration. Climate Research, 2005, 28: 143-154.
- [3] Vinikoor-Imler L C, Davis J A, Luben T J. An ecologic analysis of county-level $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and lung cancer incidence and mortality. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2011, 8(6): 1865-1871.
- [4] Behera S N, Sharma M. Transformation of atmospheric ammonia and acid gases into components of $\text{PM}_{2.5}$: an environmental chamber study. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 19(4): 1187-1197.
- [5] Yin L Q, Niu Z C, Chen X Q, Chen J S, Zhang F W, Xu L L. Characteristics of water-soluble inorganic ions in $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{2.5-10}$ in the coastal urban agglomeration along the Western Taiwan Strait Region, China. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(7): 5141-5156.
- [6] 陈永桥,张逸,张晓山. 北京城乡结合部气溶胶中水溶性离子粒径分布和季节变化. 生态学报, 2005, 25(12): 3231-3236.
- [7] 陶俊,张仁健,董林,张涛,朱李华,韩静磊,许振成. 夏季广州城区细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{1.0}$ 中水溶性无机离子特征. 环境科学, 2010, 31(7): 1417-1424.
- [8] Morrow P E, Utell M J, Bauer M A, Speers D M, Gibb F R. Effects of near ambient levels of sulphuric acid aerosol on lung function in exercising subjects with asthma and chronic obstructive pulmonary disease. Annals of Occupational Hygiene, 1994, 38(inhaled particles VII): 933-938.
- [9] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, Dragosits U, Skiba U, Smith R I, Donovan R G, Brett H E, Hewitt C N, Nemitz E. Quantifying the effect

- of urban tree planting on concentrations and depositions of PM_{10} in two UK conurbations. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(38): 8455-8467.
- [10] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 张会兰. 细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)与植被关系的研究综述. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [11] 王蕾, 高尚玉, 刘连友, 哈斯. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究. *应用生态学报*, 2006, 17(4): 597-601.
- [12] 麦华俊, 蒋靖坤, 何正旭, 郝吉明. 一种纳米气溶胶发生系统的设计及性能测试. *环境科学*, 2013, 34(8): 2950-2954.
- [13] 张芳芳, 韩明玉, 张立新, 刘长虹, 赵彩平. 红富士苹果对初夏土施 ^{15}N -尿素的吸收、分配和利用特性. *果树学报*, 2009, 26(2): 135-139.
- [14] 顾曼如. ^{15}N 在苹果氮素营养研究中的应用. *中国果树*, 1990, (2): 46-48.
- [15] 徐季娥, 林裕益, 吕瑞江, 陈良, 高占峰. 鸭梨秋施 ^{15}N -尿素的吸收与分配. *园艺学报*, 1993, 20(2): 145-149.
- [16] 赵登超, 姜远茂, 彭福田, 何乃波, 张序, 隋静, 侯立群. 冬枣秋季不同枝条叶施 ^{15}N -尿素的贮藏、分配及再利用. *核农学报*, 2007, 21(1): 87-90.
- [17] Guak S, Neilsen D, Millard P, Looney N E. Leaf absorption, withdrawal and remobilization of autumn-applied urea- ^{15}N in apple. *Canadian Journal of Plant Science*, 2004, 84(1): 259-264.
- [18] Miller A J, Smith S J. Cytosolic nitrate ion homeostasis; could it have a role in sensing nitrogen status? *Annals of Botany*, 2008, 101(4): 485-489.
- [19] 田东梅, 孙敬茹, 张曦, 苏晓华, 沈应柏. 3 种黑杨无性系耐氮瘠薄能力的差异. *西北农业学报*, 2010, 19(9): 75-79.
- [20] Zhao S P, Ye X Z, Zhang Y Z, Zheng J C. The contribution of *bnnrt1* and *bnnrt2* to nitrate accumulation varied according to genotypes in Chinese cabbage. *African Journal of Biotechnology*, 2013, 9(31): 4910-4917.
- [21] 潘中耀. 橡胶树幼苗对不同形态 ^{15}N 标记氮肥的吸收、分配和利用特性研究 [D]. 海南: 海南大学, 2010.
- [22] Nagai M, Ohnishi M, Uehara T, Yamagami M, Miura E, Kamakura M, Kitamura A, Sakaguchi S, Sakamoto W, Shimmen T, Fukaki H, Reid R J, Furukawa A, Mimura T. Ion gradients in xylem exudate and guttation fluid related to tissue ion levels along primary leaves of barley. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(10): 1826-1837.
- [23] 董雯怡, 聂立水, 韦安泰, 李吉跃, 沈应柏, 张志毅. 毛白杨对 ^{15}N -硝态氮和铵态氮的吸收、利用及分配. *核农学报*, 2009, 23(3): 501-505.
- [24] 管长志, 曾骧, 孟昭清. 山葡萄(*Vitis amurensis* Rupr)晚秋叶施 ^{15}N -尿素的吸收、运转、贮藏及再分配的研究. *核农学报*, 1992, 6(3): 153-158.