

DOI: 10.20103/j.stxb.202405091040

房佳兴, 李少宁, 柴硕, 赵娜, 徐晓天, 李斌, 张俊杰, 王梦雪, 张琴, 刘辰, 吕金昊, 鲁绍伟. 北京典型绿化乔木对 $\text{PM}_{2.5}$ 无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收和分配机制. 生态学报, 2025, 45(2): 837-853.

Fang J X, Li S N, Chai S, Zhao N, Xu X T, Li B, Zhang J J, Wang M X, Zhang Q, Liu C, Lü J H, Lu S W. Study on the uptake and distribution mechanisms of inorganic components NH_4^+ and NO_3^- from $\text{PM}_{2.5}$ by typical urban greening trees in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 837-853.

北京典型绿化乔木对 $\text{PM}_{2.5}$ 无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收和分配机制

房佳兴^{1,2,3}, 李少宁^{1,2,3}, 柴 硕^{1,2,3}, 赵 娜^{1,2}, 徐晓天^{1,2}, 李 斌^{1,2}, 张俊杰^{1,2,3}, 王梦雪^{1,2,3},
张 琴^{1,2,3}, 刘 辰^{1,2,3}, 吕金昊⁴, 鲁绍伟^{1,2,3,*}

1 北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093

2 国家林业和草原局北京燕山森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100093

3 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866

4 辽宁省沙地治理与利用研究所, 阜新 123008

摘要:植物能有效吸收大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 改善空气质量, 探明其吸收和分配 $\text{PM}_{2.5}$ 机理对提高植物生态功能和改善生态环境意义重大。利用一次性熏气法结合 ^{15}N 示踪法探究北京典型绿化乔木油松 (*Pinus tabulaeformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、旱柳 (*Salix matsudana*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、国槐 (*Styphnolobium japonicum*) 和栾树 (*Koelreuteria paniculata*) 对 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收与分配特征。结果表明: (1) 植物能有效吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ (0.03—0.80 $\mu\text{g/g}$) 和 NO_3^- (0.02—1.10 $\mu\text{g/g}$)。对 NH_4^+ 吸收能力表现为旱柳和油松最强, 其次是银杏和栾树, 白皮松和国槐最弱; 对 NO_3^- 吸收能力表现为旱柳和油松最强, 其次是白皮松和国槐, 栾树和银杏最弱。(2) 植物地上器官 ^{15}N 吸收能力和分配率大于地下器官。叶片对两种离子的吸收能力 (NH_4^+ : 0.08—1.63 $\mu\text{g/g}$, NO_3^- : 0.01—1.18 $\mu\text{g/g}$) 和分配率 (NH_4^+ : 18.95%—76.10%, NO_3^- : 6.86%—91.64%) 最高。(3) 不同浓度、树种及二者交互作用显著影响各器官 ^{15}N 吸收能力和分配率 ($P < 0.01$), 其中地上器官吸收能力随浓度升高而增加。(4) 具有较小根冠比、粗根生物量比和较大枝生物量比特征的植物更利于吸收 NH_4^+ ; 具有较小根冠比、粗细根生物量比和较大干生物量比特征的植物更利于吸收 NO_3^- 。研究结果进一步揭示植物吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 机制及其与自身因素 (植物性状) 和自然因素 ($\text{PM}_{2.5}$ 浓度) 的关系, 对不同污染程度地区如何有效利用植物净化 $\text{PM}_{2.5}$ 污染提供科学依据。

关键词:典型绿化乔木; 一次性熏气法; ^{15}N 示踪; $\text{PM}_{2.5}$ 无机成分; 吸收与分配

Study on the uptake and distribution mechanisms of inorganic components NH_4^+ and NO_3^- from $\text{PM}_{2.5}$ by typical urban greening trees in Beijing

FANG Jiaying^{1,2,3}, LI Shaoning^{1,2,3}, CHAI Shuo^{1,2,3}, ZHAO Na^{1,2}, XU Xiaotian^{1,2}, LI Bin^{1,2}, ZHANG Junjie^{1,2,3},
WANG Mengxue^{1,2,3}, ZHANG Qin^{1,2,3}, LIU Chen^{1,2,3}, LÜ Jinhao⁴, LU Shaowei^{1,2,3,*}

1 Institute of Forestry and Pomology, Beijing of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China

2 Beijing Yanshan Forest Ecosystem Research Station, National Forest and Grassland Administration, Beijing 100093, China

3 Forestry College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

4 Liaoning Institute of Sandy Land Control and Utilization, Fuxin 123008, China

基金项目:北京市自然科学基金面上项目 (8212044); 北京市农林科学院科技创新能力建设项目 (KJCX20240701); 北京市自然科学基金面上项目 (8212031); 国家林业和草原局林业科技创新平台项目 (2023132047)

收稿日期: 2024-05-09; 采用日期: 2024-10-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hblsw@163.com

Abstract: Plants play a pivotal role in mitigating PM_{2.5} pollution by efficiently absorbing particulate matter from the atmosphere, thereby contributing to the improvement of air quality. Understanding the mechanisms underlying PM_{2.5} uptake and its subsequent distribution within plant tissues is crucial for enhancing the ecological functions of vegetation and fostering a healthier environment. This study employed a one-time fumigation approach, coupled with a ¹⁵N tracer method, to investigate the mechanisms of PM_{2.5} uptake and distribution in several representative tree species across Beijing. The selected species included Manchurian red pine (*Pinus tabulaeformis*), Bunge's pine (*Pinus bungeana*), Corkscrew willow (*Salix matsudana*), Ginkgo (*Ginkgo biloba*), Japanese pagoda tree (*Styphnolobium japonicum*), and Goldenrain tree (*Koelreuteria paniculata*). Our focus was on the uptake and distribution characteristics of the water-soluble inorganic constituents ammonium (NH₄⁺) and nitrate (NO₃⁻). The findings revealed several key insights: (1) The examined plants exhibited effective uptake of NH₄⁺ (ranging from 0.03 to 0.80 μg/g) and NO₃⁻ (ranging from 0.02 to 1.10 μg/g) from PM_{2.5}. Among the species, the Corkscrew willow and Manchurian red pine demonstrated the highest ammonium uptake ability, followed by Ginkgo and Goldenrain tree, while Bunge's pine and Japanese pagoda tree showed the lowest uptake ability. In terms of nitrate, Corkscrew willow and Manchurian red pine again led in uptake ability, with Bunge's pine and Japanese pagoda tree following, and Goldenrain tree and Ginkgo exhibiting the least uptake ability. (2) The ability for ¹⁵N uptake and the allocation of nitrogen within above-ground plant organs surpassed that of their underground counterparts. Notably, leaves possessed the highest uptake ability (NH₄⁺: 0.08—1.63 μg/g, NO₃⁻: 0.01—1.18 μg/g) and partitioning rate (NH₄⁺: 18.95%—76.10%, NO₃⁻: 6.86%—91.64%) for both ions. (3) Statistical analysis indicated that varying concentrations of PM_{2.5}, tree species, and their interactions significantly influenced the ¹⁵N uptake ability and distribution rates within different organs ($P < 0.01$), with the uptake ability of above-ground organs increasing in response to higher concentrations. (4) Plants exhibiting a smaller root-crown ratio, increased root biomass ratio, and larger branch biomass ratio were found to be more conducive to NH₄⁺ uptake, while those characterized by a smaller root-crown ratio, thicker and finer root biomass, along with a larger stem biomass ratio, were more favorable for NO₃⁻ uptake. This study elucidates the mechanisms by which plants uptake PM_{2.5} and highlights the interplay between intrinsic (plant traits) and extrinsic factors (PM_{2.5} concentration). The insights garnered provide a scientific foundation for leveraging plant-based strategies to mitigate PM_{2.5} pollution across various environmental contexts.

Key Words: typical green trees; one-time aerosol treatment method; ¹⁵N tracing; PM_{2.5} inorganic composition; uptake and distribution

空气污染造成全球重大健康风险,PM_{2.5}(直径≤2.5 μm 的大气颗粒物)是城市环境中最具威胁性空气污染物之一^[1-3],近年来与 PM_{2.5}相关的人类过早死亡事件越来越多^[4-5]。2019 年全球 99% 以上人口生活环境的 PM_{2.5}浓度超过了世界卫生组织(WHO)年度空气质量指南(AQG)^[6],人们越来越意识到 PM_{2.5}对人体健康的危害,因此治理 PM_{2.5}污染已成为全球一项迫切而重要的任务^[7-8]。城市中增加植被是减缓空气污染的有效手段,大量研究表明森林植被通过减尘、滞尘、降尘和阻尘等多种途径对 PM_{2.5}有显著消减作用^[9-11]。植物净化 PM_{2.5}在全球已初见成效^[12-13],2003 年意大利威尼斯等 10 个城市森林去除颗粒物能力约为 8.60 g/m²^[14];1999—2013 年中国华北平原森林对 PM_{2.5}干沉降去除量约为 2.47×10⁷ t^[15]。基于植物对 PM_{2.5}净化作用,越来越多植物生物过滤器作为新型空气净化器在室内出现^[16],该领域相关研究也日益增多,植物吸附作用受到生态学广泛关注^[17]。

该领域前期研究大多集中于宏观尺度,即通过监测植被区与非植被区大气 PM_{2.5}浓度来量化林木尺度对 PM_{2.5}的净化率^[18-20]。随着研究不断深入,越来越多研究聚焦于微观尺度上植物个体对 PM_{2.5}净化能力研究^[21-23]。总体而言,目前大多数微观尺度研究集中在植物对 PM_{2.5}单位叶面积的吸附量或元素沉积量^[24-26],

以及叶表微观形态与其吸附量的关系^[27-29],对于植物直接吸收和分配 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究相对较少,且这些研究多侧重于植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 的净化效果,忽略了植物吸收净化 $\text{PM}_{2.5}$ 的机理。研究证实,植物能够通过叶片气孔将大气污染物吸进体内^[30],并将其转化为植物营养和能量^[31]。但吸入的污染物在植物体内各器官如何分配并不明确,同时考虑到自然环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化以及不同污染地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的差异,因此深入研究植物各器官对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸收分配机制及其与污染浓度的关系是该领域研究的重要方向,从而为合理利用植物生态功能提供科学依据。

水溶性无机盐是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要组分之一,其体积的变化对雾霾的演变有显著促进作用^[32],对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的贡献率达 40% 以上,其中 NH_4^+ 和 NO_3^- 均是其主要的两种离子^[33],利用同位素标记 $^{15}\text{NH}_4^+$ 和 $^{15}\text{NO}_3^-$ 中 ^{15}N 并进行追踪即可研究 $\text{PM}_{2.5}$ 在植物体内吸收和分布状况。然而,以往利用同位素技术研究植物吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究多采用连续多日的持续性熏气法^[33-35],此过程会不断有新的 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒进入到模拟系统内,导致植物在吸收饱和后经过自我调整仍可继续吸收 $\text{PM}_{2.5}$,因此无法量化植物各器官在一次污染事件中的对 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸收能力及分配率。

基于此,本研究以油松 (*Pinus tabulaeformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、旱柳 (*Salix matsudana*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、国槐 (*Styphnolobium japonicum*) 和栾树 (*Koelreuteria paniculata*) 6 种乔木为研究对象,利用一次性熏气法结合 ^{15}N 同位素示踪法量化植物不同器官在一次污染事件中对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 的具体吸收值和分配情况,并揭示不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和植物特性对各器官 ^{15}N 吸收能力的影响。叶片气孔是 $\text{PM}_{2.5}$ 进入植物体内的主要通道,之后 $\text{PM}_{2.5}$ 会经过枝、干、粗根最后传输到细根,因此本研究提出以下假设:(1) 叶片对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收能力和分配率最大;(2) 各器官的吸收能力随 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高而增加;(3) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、树种及植物性状态会影响植物 ^{15}N 的吸收能力。

1 材料和方法

1.1 研究区概况和供试树种

本试验于 2022 年 8 月在北京市农林科学院林业果树研究所 (39°59'35"N, 116°13'13"E) 内进行,试验苗木在资源圃栽培养护,人工模拟试验在室内实验室开展。此处位于北京市北四环至北五环之间,属于典型暖温带半湿润大陆性季风气候,2017—2021 年均降水量 548.12 mm,年均气温 13.8 °C, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 44.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[36],该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要来源于机动车尾气,其中冬季污染程度最高。

试验树种选取树龄 1—2 年、高度 60—90 cm、冠幅 40 cm×40 cm 左右、胸径 1.0—1.5 cm、长势及形状大致相同的油松 (*Pinus tabulaeformis*)、白皮松 (*Pinus bungeana*)、旱柳 (*Salix matsudana*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、国槐 (*Styphnolobium japonicum*) 和栾树 (*Koelreuteria paniculata*) 6 种乔木扦插盆栽苗 (包含 2 种常绿针叶树种和 4 种落叶阔叶树种),其中油松和白皮松属于松科,旱柳属杨柳科,银杏属银杏科,国槐属豆科,栾树属无患子科。6 种植物在中国典型绿化树种中极具代表性,具有较强生物学特性。油松被誉为“中国松”;银杏为全球最老的孑遗树种,有植物界活化石之称;国槐原产于中国,被誉为北京市市树。6 种植物的植物性状信息见表 1。

1.2 试验方法

一次性熏气法:具体设备如图 1 所示。室内模拟系统由模拟箱和气溶胶发生器两部分组成。模拟箱是体积为 1 m^3 正方体,框架采用铝合金制成,六面覆盖聚四氟乙烯膜作为箱体材料 (聚四氟乙烯因其优异的物理化学特性几乎不对大气污染物产生吸附作用,有助于减小试验误差)。模拟箱设有进出气口以供气体输送和排放,进气口连接气溶胶发生器以引入 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒。模拟箱内配备有空气净化器在试验前后净化箱内空气,以确保试验过程中没有其他污染气体干扰。此外,模拟箱还配备有风扇用于加快 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒与空气充分混合,除湿机用于降低因植物呼吸作用造成箱内过高的湿度,温湿度器用于监测和调节温湿度以满足试验要求,以及精度为 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪来实时监测箱内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 (测量值为 5 分钟平均值)。模拟箱的温度设定为 25 °C,湿度设定在 60%—70% 之间,因为植物在此温湿度条件下生长状态良好,能够以良好状态吸收大气

污染物。本研究设置试验组和对照组,对照组置放植物不接受熏气处理,试验组放置植物并接受熏气处理。为确保树种叶片的气孔完全打开以吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒,试验前使用超纯水彻底清洗植株,并将其放置在纯净无污染的箱体中待其自然干燥。为防止试验盆栽的花盆及土壤吸附 $\text{PM}_{2.5}$,使用聚四氟乙烯膜将 $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪和栽有树种的花盆密封。将树种放置于模拟箱内,利用气溶胶发生器向模拟箱内均匀通入气体。当模拟箱内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到设定值并保持稳定时停止气体通入,并密封模拟箱(包括进出气口),此时试验开始,24 h 后试验结束,每组试验 3 个重复。

表 1 植物性状信息

Table 1 Plant trait information

树种 Species	比叶面积 Specific leaf area/ (cm^2/g)	根冠比 Root/shoot rate	叶片生物量比 Leaf biomass rate	枝生物量比 Branch biomass rate	干生物量比 Trunk Biomass rate	粗根 生物量比 Coarse root biomass rate	细根 生物量比 Fine root biomass rate
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	55.04—63.82	0.21—0.37	0.35—0.43	0.11—0.23	0.17—0.27	0.15—0.25	0.01—0.02
白皮松 <i>Pinus tabuliformis</i>	42.23—52.31	0.16—0.29	0.29—0.38	0.14—0.19	0.27—0.38	0.12—0.21	0.00—0.01
旱柳 <i>Pinus tabuliformis</i>	46.03—59.21	0.21—0.40	0.08—0.14	0.19—0.30	0.38—0.53	0.12—0.25	0.04—0.07
银杏 <i>Pinus tabuliformis</i>	42.73—66.03	0.78—1.20	0.02—0.74	0.02—0.10	0.28—0.39	0.35—0.47	0.04—0.10
国槐 <i>Pinus tabuliformis</i>	32.88—37.77	1.28—1.91	0.07—0.13	0.05—0.07	0.20—0.28	0.52—0.58	0.02—0.08
栎树 <i>Pinus tabuliformis</i>	57.98—64.09	0.51—0.66	0.27—0.35	0.09—0.13	0.16—0.29	0.25—0.29	0.06—0.13

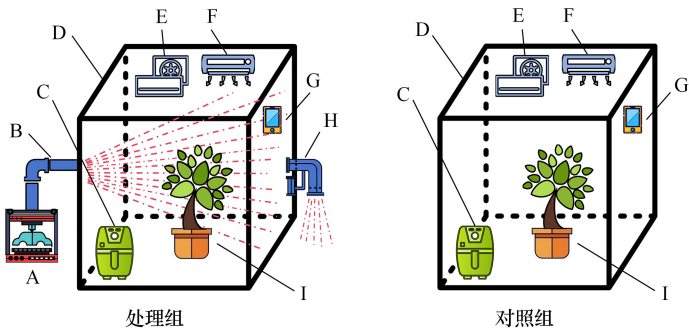


图 1 室内模拟系统

Fig.1 Indoor simulation system

A:液体气溶胶发生器;B:进气管(可密封);C:空气净化器;D:模拟箱框架;E:无级变速风扇;F:温湿度控制器;G: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测器;H:出气管(可密封);I:被试植物

^{15}N 稳定同位素示踪法:除对照组外,试验组分为 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 和 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 两个处理。将丰度为 10%的 $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ 和 $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ 分别配制成 10 g/L 溶液,加入气溶胶发生器进行一次性熏气处理试验。根据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),每个处理分别设置轻度污染($50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)、中度污染($150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)和重度污染($250\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)三个浓度。

1.3 样品处理与测定指标

试验结束后,将植物从模拟箱内取出并将其分解为叶片、枝、干、粗根和细根 5 部分(其中对叶片进行测定表面积(cm^2)),将样品放入牛皮纸袋后置入烘箱进行 10 分钟 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 杀青处理,随后 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,随后记录样品质量(g)。所有样品均用球磨仪磨成粉末,用 253plus 同位素质谱仪(Thermo Fisher Scientific, USA)、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口组成的同位素测试系统测定所有样品的 ^{15}N 原子百分比(%)和全氮含量($\mu\text{g}/\text{g}$)。根据植物各器官的生物量(g)、 ^{15}N 原子百分比(%)和全氮含量($\mu\text{g}/\text{g}$)计算以下指标。

植物各器官处理组与对照组¹⁵N 丰度差值(ΔAT):

$$\Delta AT(\%) = AT_{\text{处理}}(\%) - AT_{\text{对照}}(\%) \quad (1)$$

式中, $AT_{\text{处理}}$ 为处理组样品¹⁵N 丰度(%); $AT_{\text{对照}}$ 为处理组样品¹⁵N 丰度(%)。

植物各器官处理组相比对照组¹⁵N 增加氮元素相对原子质量($A_r(N)$)^[37]:

$$A_r(N) = 14.003047 \times (1 - \Delta AT(\%)) + 15.000109 \times \Delta AT(\%) \quad (2)$$

根据氮元素的相对原子质量计算公式和全氮含量,推导出植物各器官¹⁵N 单位质量吸收量,该指标代表各器官¹⁵N 吸收能力:

$$\text{器官}^{15}\text{N 单位质量吸收量}(\mu\text{g/g}) = \frac{\Delta AT(\%) \times 15.000109}{A_r(N)} \times \text{全氮含量}(\mu\text{g/g}) \quad (3)$$

式中, $\Delta AT(\%) \times 15.000109$ 表示处理组相比对照组的增量中¹⁵N 的相对原子质量。

植物各器官总¹⁵N 吸收量:

$$\text{总}^{15}\text{N 吸收量}(\mu\text{g}) = \text{器官单位质量}^{15}\text{N 吸收量}(\mu\text{g/g}) \times \text{器官生物量}(\text{g}) \quad (4)$$

植物各器官¹⁵N 分配率:

$$\text{器官}^{15}\text{N 分配率}(\%) = \frac{\text{器官总}^{15}\text{N 吸收量}(\mu\text{g})}{\text{植物总}^{15}\text{N 吸收量}(\mu\text{g})} \times 100\% \quad (5)$$

整株单位质量¹⁵N 吸收量,该指标代表整株植物¹⁵N 吸收能力:

$$\text{整株植物单位质量}^{15}\text{N 吸收量}(\mu\text{g/g}) = \frac{\text{植物总}^{15}\text{N 吸收量}(\mu\text{g})}{\text{整株植物总生物量}(\text{g})} \quad (6)$$

1.4 统计分析

本研究图表中的数据均用平均值±标准差表示。用 SPSS 27.0(美国,IBM)对数据进行统计分析,用单因素方差分析(ANOVA)和沃勒邓肯多重比较(Waller-Duncan)对同一 PM_{2.5} 浓度不同器官之间及同一器官不同 PM_{2.5} 浓度之间¹⁵N 单位质量吸收量(总吸收量)的差异进行显著性分析,用双因素方差分析法对 PM_{2.5} 浓度、树种及二者的交互作用对植株各器官单位质量¹⁵N 吸收量及分配率的影响进行显著性分析,用双变量相关分析法结合一般线性模型对 PM_{2.5} 浓度与植物各器官单位质量¹⁵N 吸收量的关联程度进行相关性分析,用冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)对植物性状与整株单位质量¹⁵N 吸收量的关系进行解释。本研究图表中的数据均用平均值±标准差表示。

用 Origin 2024(美国,OriginLab)、Adobe Photoshop(美国,Adobe Systems)和金山 WPS(中国,北京金山办公软件有限公司)进行绘图。

2 结果与分析

2.1 植物不同器官对¹⁵N 吸收和分配

2.1.1 植物不同器官¹⁵N 吸收能力

试验结束后,各器官处理组¹⁵N 含量均大于对照组,说明各器官均能吸收或通过再分配获取 PM_{2.5} 中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻。整体上看,各器官对 NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 吸收能力均表现为地上器官大于地下器官,地上器官是地下器官的 16.15 倍(NH₄⁺)和 8.96 倍(NO₃⁻)。叶片和干偏好吸收 NH₄⁺,枝和粗根偏好吸收 NO₃⁻,细根对两种离子吸收无偏好;油松、银杏、国槐和栎树偏好吸收 NH₄⁺,白皮松和旱柳偏好吸收 NO₃⁻。3 种 PM_{2.5} 浓度下各器官¹⁵N 吸收能力排序基本不变,地上器官¹⁵N 吸收能力随 PM_{2.5} 浓度升高而升高;各器官总¹⁵N 吸收量和吸收能力变化规律大致相同(图 2—5)。

针对 NH₄⁺:¹⁵N 吸收能力均值表现为叶片(0.49 μg/g)最大,枝(0.43 μg/g)和干(0.29 μg/g)次之,细根(0.04 μg/g)和粗根(0.01 μg/g)最低。叶片吸收能力表现为旱柳(0.97 μg/g)显著大于其他植物($P < 0.05$),枝表现为油松(0.89 μg/g)显著大于其他植物($P < 0.05$),干表现为各树种间差异不显著,粗根表现为油松

(0.03 $\mu\text{g/g}$) 显著大于其他植物 ($P<0.05$), 细根表现为各树种间差异不显著。

针对 NO_3^- : ^{15}N 吸收能力均值表现为叶片 (0.35 $\mu\text{g/g}$) 最大, 枝 (0.30 $\mu\text{g/g}$) 和干 (0.09 $\mu\text{g/g}$) 次之, 细根 (0.04 $\mu\text{g/g}$) 和粗根 (0.02 $\mu\text{g/g}$) 最低。除 250 $\mu\text{g/m}^3$ 浓度下枝吸收能力大于叶片, 其他浓度下各器官吸收能力排序不变。叶片和枝吸收能力均表现为各树种间差异不显著, 干表现为旱柳 (0.39 $\mu\text{g/g}$) 显著大于其他植物 ($P<0.05$), 粗根表现为油松 (0.06 $\mu\text{g/g}$) 显著大于其他植物 ($P<0.05$), 细根表现为白皮松 (0.08 $\mu\text{g/g}$) 显著大于其他植物 ($P<0.05$)。

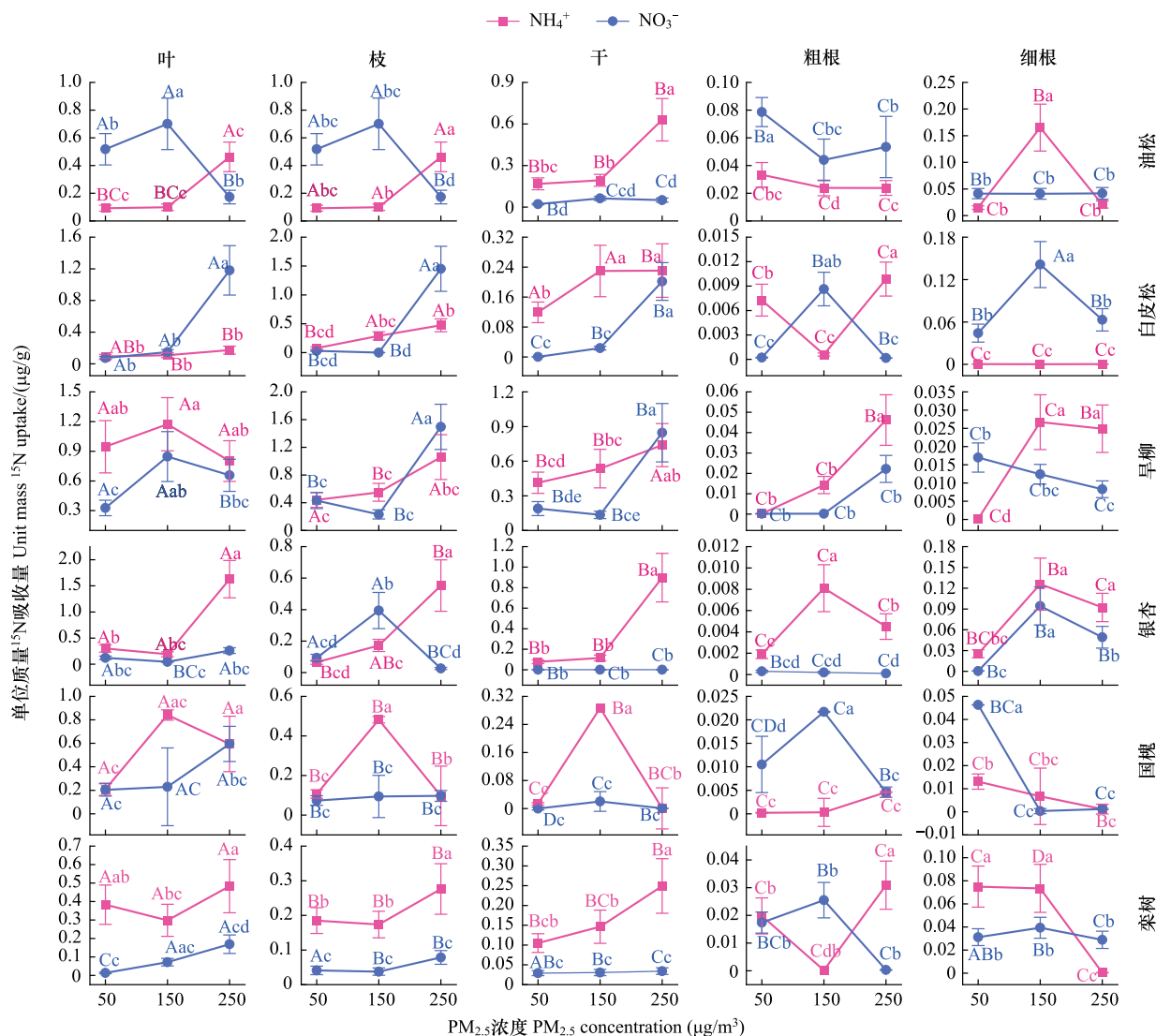


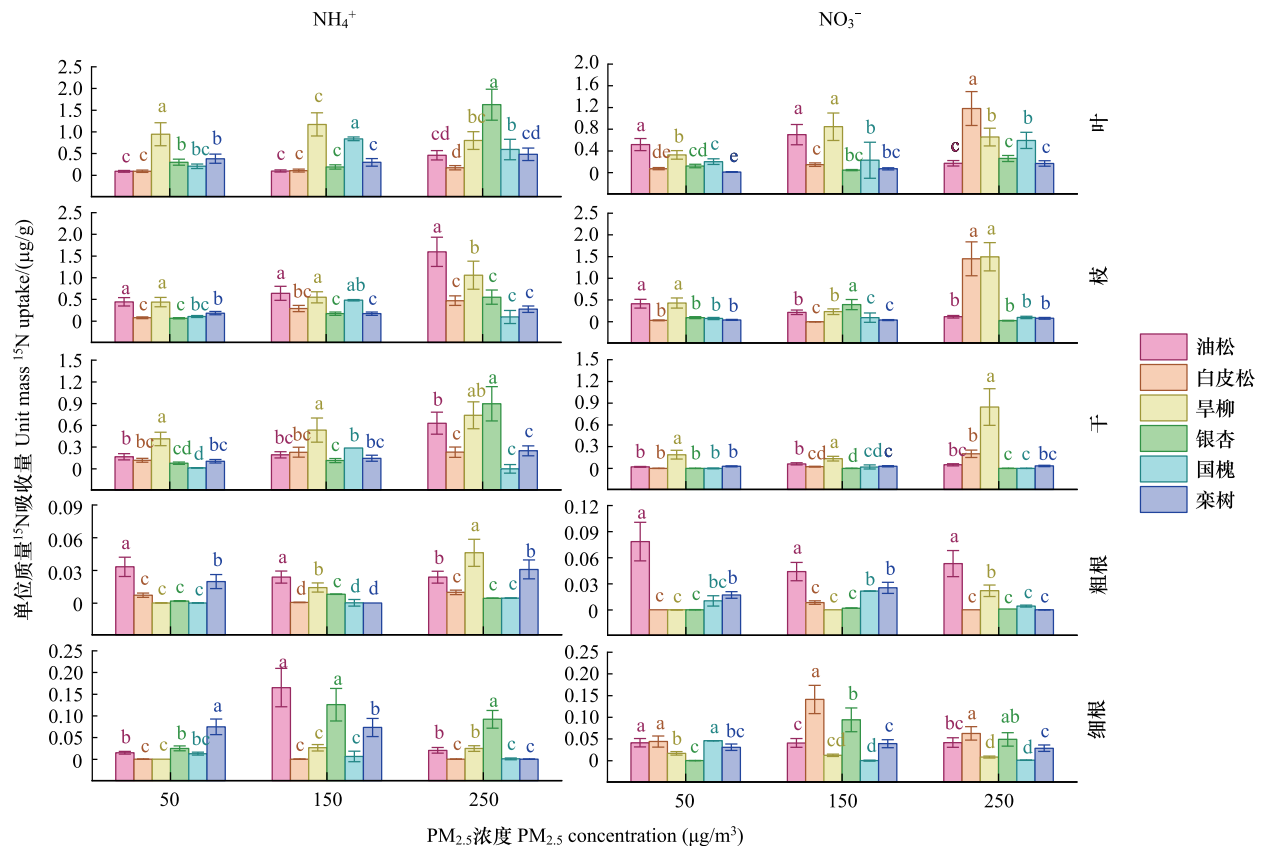
图2 各器官单位质量 ^{15}N 吸收量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系

Fig.2 Relationship between ^{15}N uptake per unit mass of each organ and $\text{PM}_{2.5}$ concentration

不同大写字母表示同一处理不同器官间差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.1.2 植物不同器官 ^{15}N 分配率

植株各器官 ^{15}N 分配率反映标记物在植株体内分布及在各器官迁移分配规律。整体上看, 3种 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下植物各器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 分配率均表现为地上器官大于地下器官, 地上器官是地下器官的21.39倍(NH_4^+)和6.13倍(NO_3^-)。地上器官 ^{15}N 分配格局随 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化而变化; 3种浓度下所有器官 ^{15}N 分配格局基本一致, 各树种间器官 ^{15}N 分配率存在差异 (图6)。

图3 各树种间器官单位质量 ^{15}N 吸收量差异Fig.3 Differences in ^{15}N uptake per unit mass of organs among tree species不同字母表示不同树种间差异显著 ($P < 0.05$)

针对 NH_4^+ : ^{15}N 分配率均值表现为叶片 (43.64%) 最大, 干 (31.64%) 和枝 (21.70%) 次之, 细根 (1.63%) 和粗根 (1.40%) 最低。叶片分配率均值表现为栎树 (69.18%) 和国槐 (61.87%) 显著大于其他植物 ($P < 0.05$), 枝表现为油松 (46.08%) 显著大于其他植物 ($P < 0.05$), 干表现为银杏 (43.54%)、旱柳 (42.67%) 和白皮松 (42.46%) 显著大于其他植物 ($P < 0.05$), 粗根和细根表现为各树种间差异不显著。

针对 NO_3^- : ^{15}N 分配率均值表现为叶片 (54.44%) 最大, 枝 (22.36%) 和干 (13.39%) 次之, 粗根 (5.97%) 和细根 (3.84%) 最低。叶片分配率均值表现为白皮松 (72.42%) 和油松 (68.60%) 显著大于其他植物 ($P < 0.05$), 干表现为旱柳 (41.54%) 显著大于其他植物 ($P < 0.05$), 粗根表现为国槐 (15.84%) 显著大于其他植物 ($P < 0.05$), 枝和细根表现为各树种间差异不显著。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、树种和植物性状对植物吸收分配 ^{15}N 的影响

2.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与植物不同器官 ^{15}N 吸收能力和分配率的相关关系

由图 7 和图 8 可知, 地上器官 (叶片、枝和干) ^{15}N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 地下器官 (粗根和细根) ^{15}N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关关系不显著; 所有器官 ^{15}N 分配律与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关关系不显著。表明植物地上器官 ^{15}N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关联性较强, 地下器官与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关联性较差, 所有器官 ^{15}N 分配率与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关联性较差。

2.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、树种及二者交互作用对与植物各器官 ^{15}N 吸收能力和分配率的影响

由表 2 和表 3 可知, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、树种及二者交互作用均显著影响植物各器官 ^{15}N 吸收能力和分配率 ($P < 0.01$), 表明不同 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下不同树种各器官对 ^{15}N 的吸收分配能力存在明显差异。

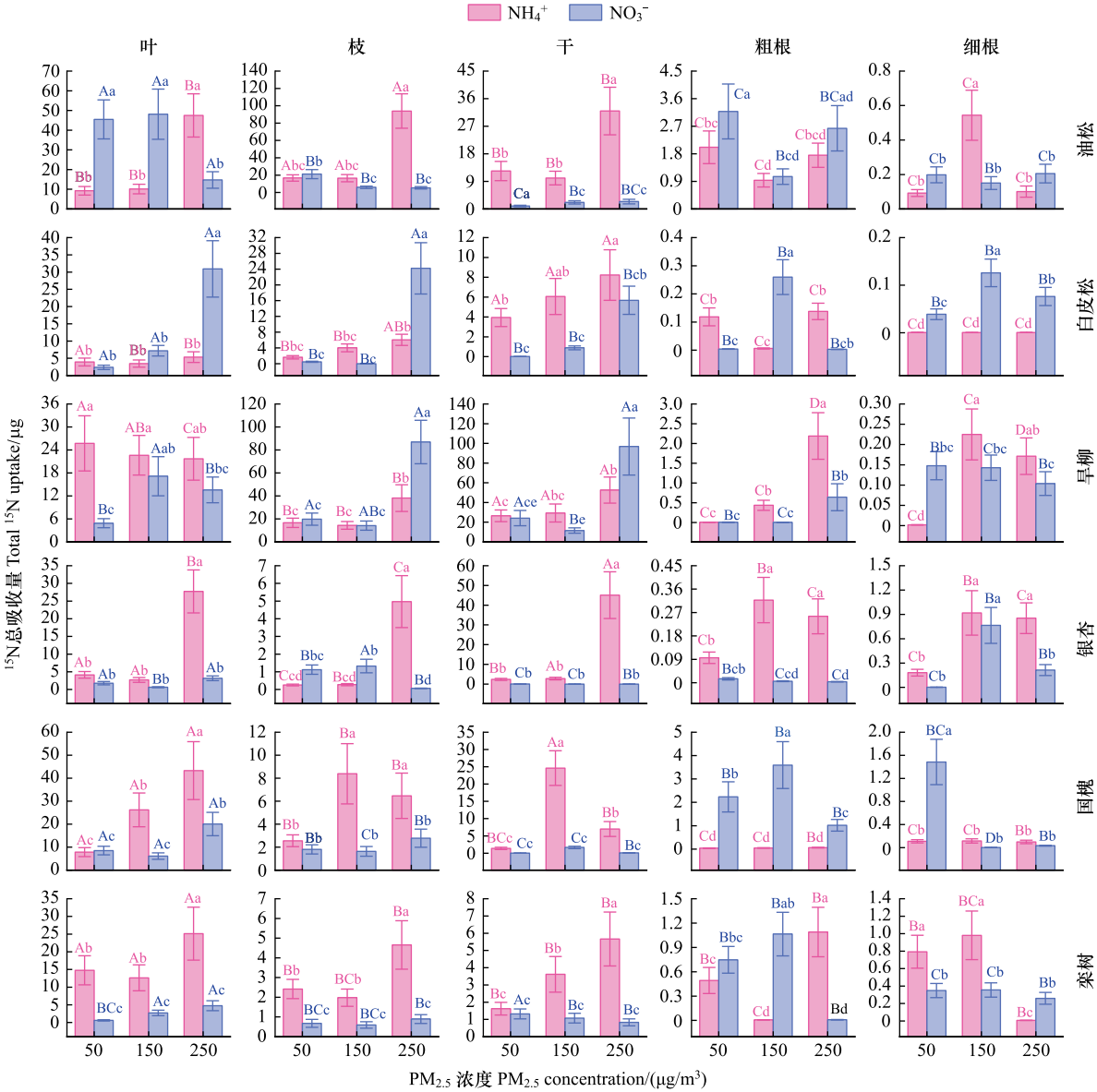


图 4 各器官总¹⁵N 吸收量与 PM_{2.5} 浓度的关系

Fig.4 Relationship between total ¹⁵N uptake of each organ and PM_{2.5} concentration

不同大写字母表示同一处理不同器官间差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著 ($P<0.05$)

表 2 不同 PM_{2.5} 浓度和树种下器官单位质量¹⁵N 吸收量方差分析结果

离子 Ionic	器官 Organ	因素 Factors	III 类平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P
NH ₄ ⁺	叶	PM _{2.5} 浓度	1.909	2	0.954	31.62	<0.01
		树种	4.939	5	0.988	32.729	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	3.818	10	0.382	12.649	<0.01
	枝	PM _{2.5} 浓度	2.311	2	1.155	56.012	<0.01
		树种	3.518	5	0.704	34.108	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	1.484	10	0.148	7.192	<0.01
	干	PM _{2.5} 浓度	0.987	2	0.493	50.176	<0.01
		树种					
		PM _{2.5} * 树种					

续表

离子 Ionic	器官 Organ	因素 Factors	III 类平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F	P
NO ₃ ⁻	粗根	树种	1.182	5	0.236	24.032	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	1.044	10	0.104	10.621	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	0.001	2	0.001	26.262	<0.01
		树种	0.005	5	0.001	39.854	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	0.004	10	0	15.847	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	0.023	2	0.012	43.975	<0.01
	细根	树种	0.05	5	0.01	38.365	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	0.048	10	0.005	18.464	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	0.793	2	0.397	25.556	<0.01
		树种	1.864	5	0.373	24.025	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	2.747	10	0.275	17.699	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	1.668	2	0.834	49.043	<0.01
	叶	树种	3.048	5	0.61	35.85	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	5.605	10	0.561	32.961	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	0.257	2	0.128	32.176	<0.01
		树种	0.996	5	0.199	49.917	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	0.761	10	0.076	19.071	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	0	2	0.001	1.759	=0.187
	枝	树种	0.021	5	0.004	77.204	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	0.004	10	0	7.885	<0.01
		PM _{2.5} 浓度	0.007	2	0.003	19.396	<0.01
		树种	0.029	5	0.006	33.688	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	0.027	10	0.003	15.315	<0.01

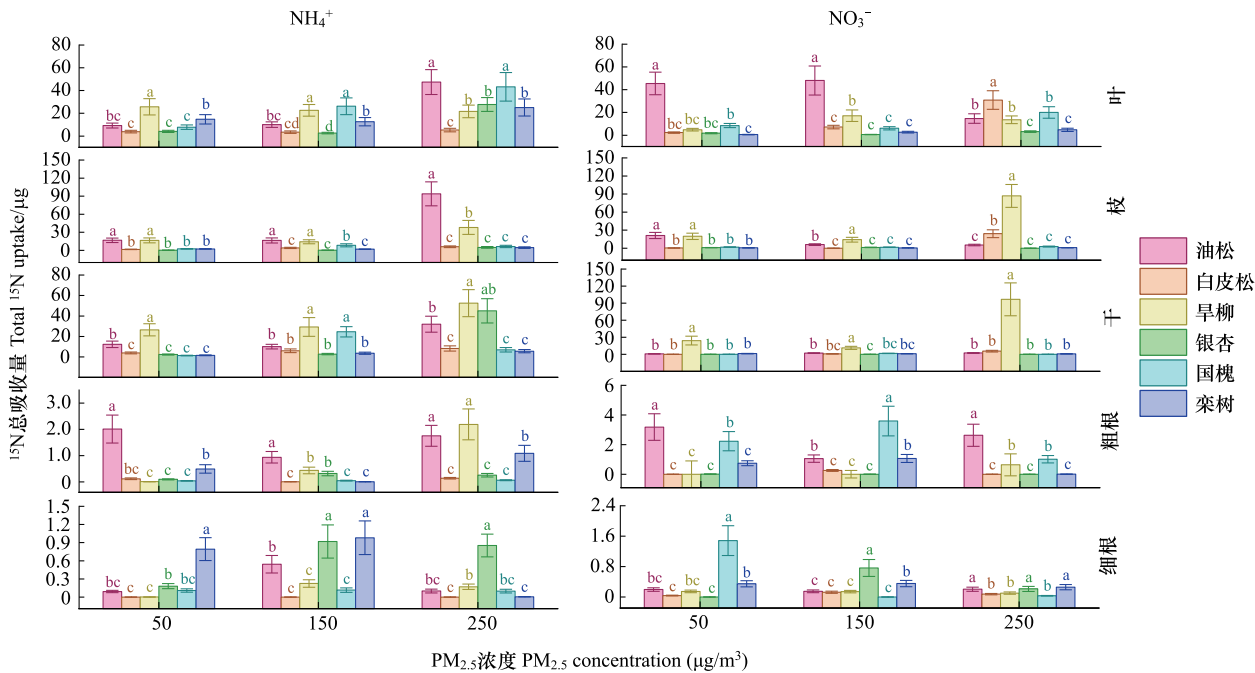


图 5 各树种间器官总¹⁵N 吸收量差异

Fig.5 Differences in total ¹⁵N uptake of organs among tree species
不同字母表示不同树种间差异显著 (P<0.05)

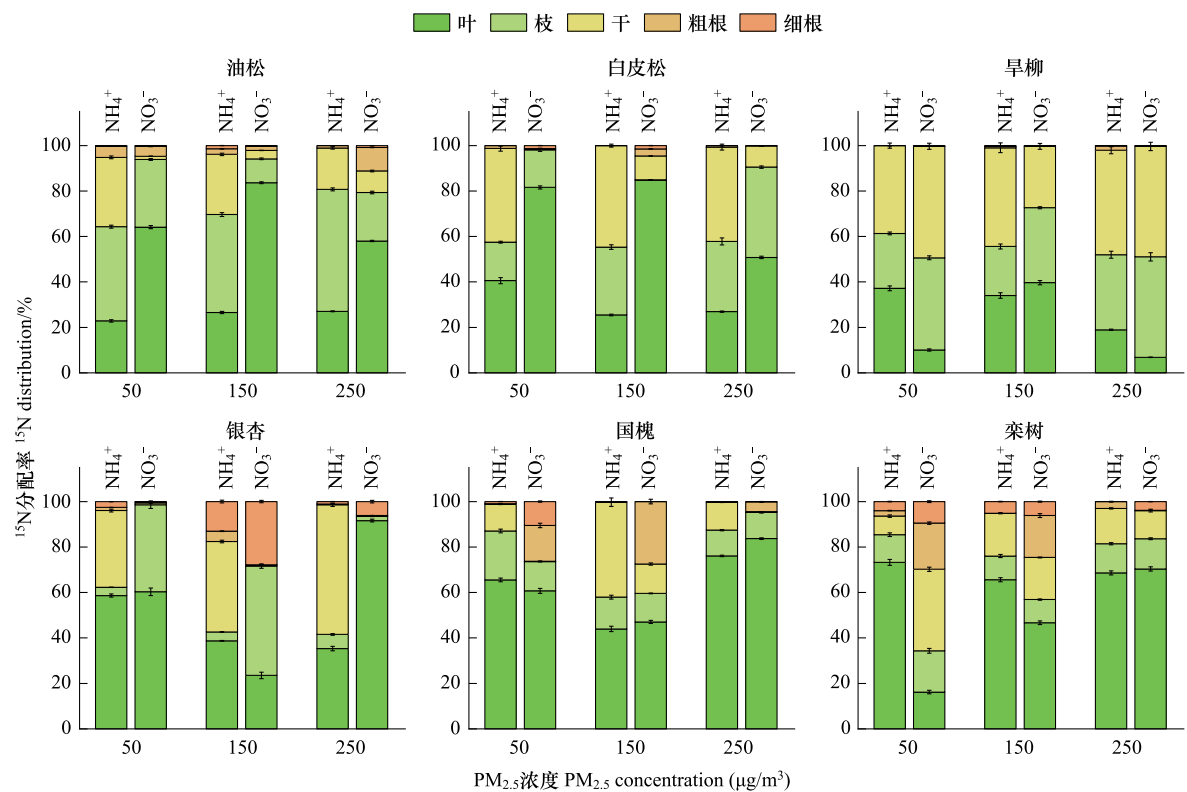


图6 各器官¹⁵N分配率与PM_{2.5}浓度的关系

Fig.6 Relationship between ¹⁵N distribution rate and PM_{2.5} concentration in each organ

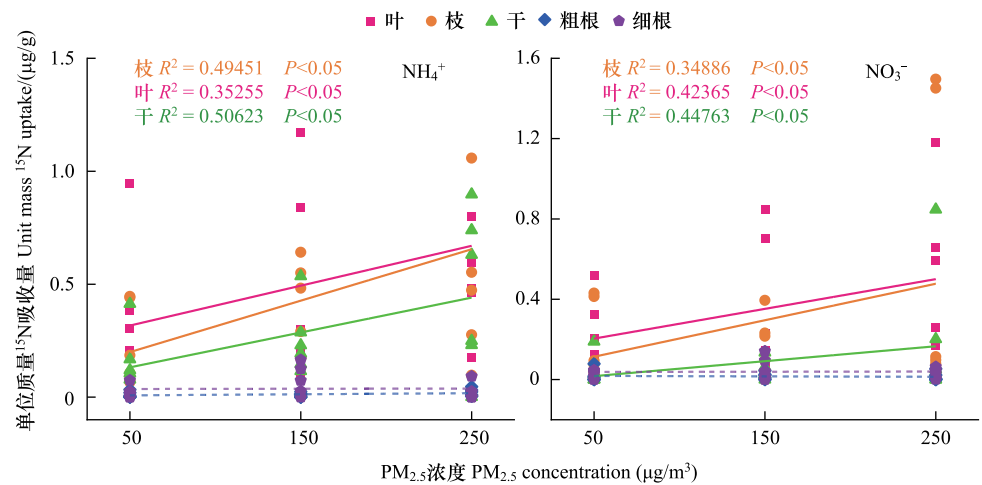


图7 PM_{2.5}浓度与各器官¹⁵N单位质量吸收量线性拟合图

Fig.7 Linear fit of PM_{2.5} concentration to ¹⁵N unit mass uptake in each organ

实线表示 x 与 y 相关性显著,虚线表示 x 与 y 相关性不显著

2.2.3 植物性状对植物整株¹⁵N吸收能力的影响

针对 NH_4^+ ,旱柳和油松整株单位质量吸收量最大,其次是银杏和栎树,最后是白皮松和国槐;针对 NO_3^- ,旱柳和油松整株单位质量吸收量最大,其次是白皮松和国槐,最后是栎树和银杏。将植物比叶面积、根冠比及叶片、枝、干、粗根、细根生物量比与植物株¹⁵N吸收能力(整株单位质量¹⁵N吸收量)进行冗余分析,其中7种植物性状作为解释变量,整株¹⁵N吸收能力作为被解释变量。第1、2排序轴特征值分别为0.03和0.01,两轴间相关

系数分别为 0.54 和 0.55,均大于 0.5,表明这些植物性状与整株¹⁵N 吸收能力的 RDA 排序结果可信(图 8)。

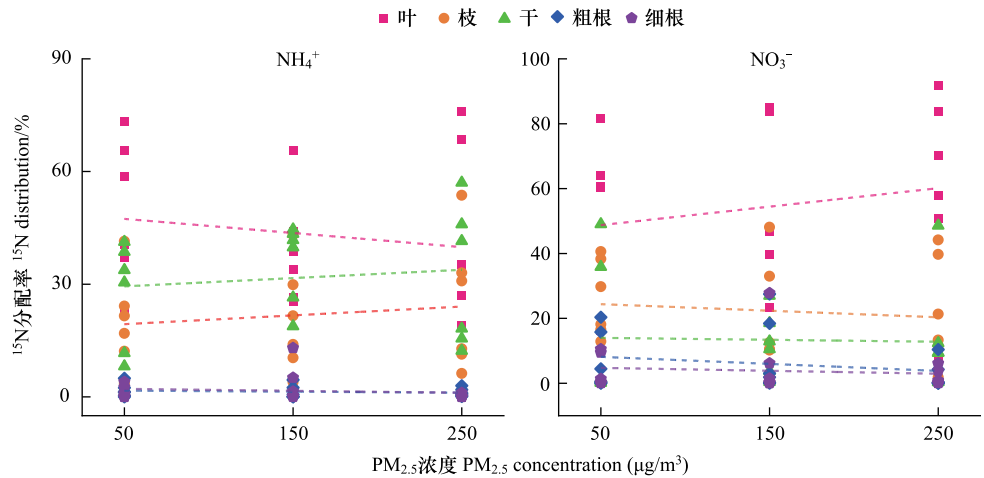


图 8 PM_{2.5}浓度与各器官¹⁵N 分配律线性拟合图

Fig.8 Linear fit of PM_{2.5} concentration to ¹⁵N distribution in each organ
实线表示 x 与 y 相关性显著,虚线表示 x 与 y 相关性不显著

表 3 不同 PM_{2.5}浓度和树种下器官¹⁵N 分配率方差分析结果

Table 3 Results of analysis of variance (ANOVA) of total ¹⁵ N uptake of organs under different PM _{2.5} concentrations and tree species							
离子 Ionic	器官 Organ	因素 Factors	III 类平方和 Type III sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
NH ₄ ⁺	叶	PM _{2.5} 浓度	1074.352	2	537.176	791.317	<0.01
		树种	14926.757	5	2985.351	4397.737	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	2595.179	10	259.518	382.297	<0.01
	枝	PM _{2.5} 浓度	238.354	2	119.177	177.483	<0.01
		树种	9541.113	5	1908.223	2841.799	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	796.421	10	79.642	118.606	<0.01
	干	PM _{2.5} 浓度	647.388	2	323.694	325.214	<0.01
		树种	7410.633	5	1482.127	1489.085	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	2520.295	10	252.029	253.213	<0.01
	粗根	PM _{2.5} 浓度	2.936	2	1.468	277.218	<0.01
		树种	44.543	5	8.909	1682.119	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	72.417	10	7.242	1367.378	<0.01
	细根	PM _{2.5} 浓度	89.623	2	44.812	1992.875	<0.01
		树种	223.247	5	44.649	1985.664	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	211.559	10	21.156	940.853	<0.01
NO ₃ ⁻	叶	PM _{2.5} 浓度	1168.933	2	584.467	901.25	<0.01
		树种	17944.284	5	3588.857	5534.031	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	17455.865	10	1745.587	2691.701	<0.01
	枝	PM _{2.5} 浓度	440.553	2	220.276	371.72	<0.01
		树种	4713.674	5	942.735	1590.882	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	6366.657	10	636.666	1074.385	<0.01
	干	PM _{2.5} 浓度	53.513	2	26.756	58.001	<0.01
		树种	11105.858	5	2221.172	4814.913	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	2401.846	10	240.185	520.657	<0.01
	粗根	PM _{2.5} 浓度	342.839	2	171.419	1013.554	<0.01
		树种	2133.652	5	426.73	2523.133	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	1345.748	10	134.575	795.702	<0.01
	细根	PM _{2.5} 浓度	156.334	2	78.167	1536.648	<0.01
		树种	861.62	5	172.324	3387.631	<0.01
		PM _{2.5} * 树种	1386.718	10	138.672	2726.081	<0.01

整体来看,根冠比和粗根生物量比与植物对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的整株 ^{15}N 吸收能力均呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),枝生物量比与植物对 NH_4^+ 的整株 ^{15}N 吸收能力呈显著正相关关系 ($P < 0.05$),干生物量比与植物对 NO_3^- 的整株 ^{15}N 吸收能力呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。表明较小根冠比、粗根生物量比和较大枝生物量比的植物利于吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ ;较小根冠比、粗细根生物量比和较大干生物量比的植物利于吸收 NO_3^- ,比叶面积对植物吸收两种离子 ^{15}N 的能力影响不大。

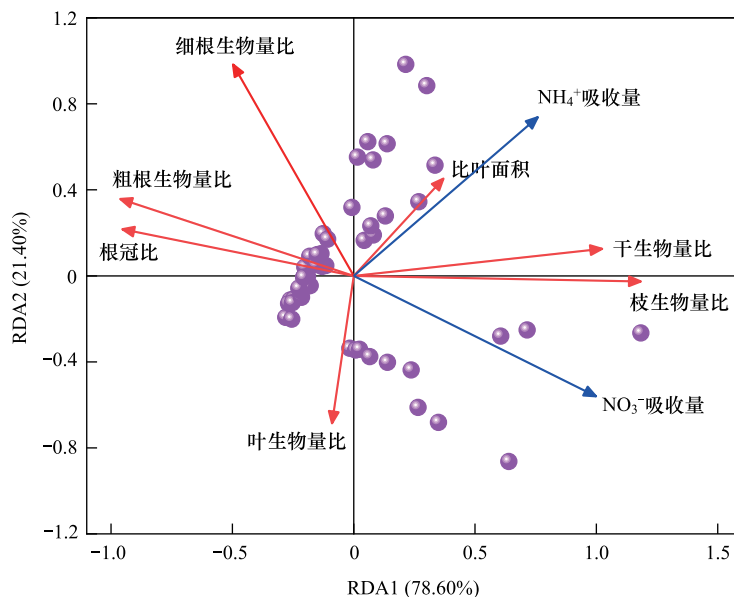


图9 植物性状与植物整株 ^{15}N 吸收能力之间冗余分析

Fig.9 Redundancy analysis between plant traits and plant whole-plant ^{15}N uptake ability

3 讨论

3.1 植物不同器官 ^{15}N 吸收能力和分配率差异

迄今为止,虽有相关研究证实植物叶片能够阻滞、吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 等颗粒物^[38—39],但对植物将 $\text{PM}_{2.5}$ 吸入体内的研究相对匮乏且不够深入。本研究通过一次性熏气法结合 ^{15}N 示踪法对植物不同器官在一次 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件中对 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收能力和分配率进行量化,发现其吸收能力十分可观且各器官间存在差异。

在本研究中,植物 5 个器官处理组单位质量 ^{15}N 含量均大于对照组,表明植物确实通过叶片气孔将 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸入体内并分配给其他器官,因为气孔的作用是将植物体内部与外部进行气体交换,所以在气体交换过程中大气污染物会顺势进入叶片气孔^[40—41]。在所有大气污染物中,气态污染物相比固体颗粒物更容易进入植物叶片气孔,但由于 $\text{PM}_{2.5}$ 在固体颗粒物中(如 TSP、 PM_{10} 等)粒径很小,因此很容易进入到叶片气孔中^[42]。光照条件利于植物气孔打开,本试验开始时间为晴天的早上,植物处在气孔充分打开的状态下吸收 $\text{PM}_{2.5}$,因此本研究得到的单位质量吸收量结果为植物最佳状态下的吸收量。除了白天,夜晚植物也会打开部分气孔进行蒸腾作用^[43],所以夜晚植物也会吸收 $\text{PM}_{2.5}$,相比白天较少。有研究发现,除了叶片气孔,片表皮角质层亲水小孔和叶表细胞质外连丝也是溶质由叶表进入叶片肉细胞的通道之一^[44],所以本研究猜测 $\text{PM}_{2.5}$ 也可能通过这些通道进入植物叶片。

本研究植物不同器官对 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收及分配存在差异。叶片对两种离子的吸收分配均为最高,这符合本研究的假设,因为叶片气孔是 $\text{PM}_{2.5}$ 进入植物体内的主要通道,两种离子从顶部传输到底部需要一定时间,所以短期内吸收的两种离子不会立即大量传输给其他器官;而且叶片在植物所有器官中生长及代

谢最为旺盛,其氮含量随植株快速生长不断累积,本研究结果也验证了 Gu 等^[45] 早期研究结论,虽然植物对¹⁵N 吸收分配格局会随植物生长中心转移而改变,但叶片内积累仍较多。除了叶片,枝和干对两种离子的吸收和分配能力也较高,个别植物甚至在某种浓度下超过了叶片,因为木质部作为水溶性无机离子主要运转通道及贮藏的“临时库”^[46],短时间内吸收征调能力强于其他器官;且枝和干上面皮孔及角质层也能吸收气体污染物^[47],因此本研究猜测其也会吸收粒径微小的颗粒物,吸收量较少。粗根和细根在所有器官中吸收能力和分配率表现较低,因为根部在植物最底端,所以短时间内一些¹⁵N 未运输到此,符合本研究假想。但本研究结果和刘庆倩等^[34] 结果不同,其结果发现细根的¹⁵N 吸收能力很强,这是因为二者研究方法不同,其采用持续性熏气法,本研究采用一次性熏气法,时间较持续熏气法更短,吸收的¹⁵N 还未完全运输至根部。

本研究发现植物不同器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收也有偏好性,这可能是由各器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 的吸收征调能力不同造成的。有研究已证实植物不同器官对不同氮源吸收存在偏好性,如 Pan 等^[48] 研究橡胶树 (*Hevea brasiliensis*) 对 4 种氮肥吸收分配特性,发现叶片对 4 种氮源的喜好表现为 $\text{NH}_4\text{NO}_3 > \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 > (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{CO}(\text{NH}_2)_2$,树干对 4 种氮源的喜好表现为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 > \text{NH}_4\text{NO}_3 > (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 。

3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对植物不同器官¹⁵N 吸收和分配的影响

在自然界中,不同污染区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不尽相同,同一污染区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也随时间变化波动不定,因此植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸收分配情况随浓度变化也会发生变化,探究不同浓度植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸收和分配情况具有实际意义。本研究发现植物地上器官对两种离子的¹⁵N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈正相关关系,地下器官对两种离子¹⁵N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度无显著相关关系,所有器官对两种离子¹⁵N 分配律与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度无显著相关关系。

植物地上器官对两种离子¹⁵N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈正相关关系表明植物地上器官在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高的环境中会吸收更多 $\text{PM}_{2.5}$ 。这是由于地上器官对¹⁵N 的吸收征调能力整体随 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高而增强所造成。地上器官对¹⁵N 吸收征调能力随浓度升高而增强的原因是植物叶片在受到较高浓度污染物胁迫下发生短期激发效应,在 50—250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 这一浓度范围没有打破植物对 N 吸收的平衡点,因此叶片吸收能力随浓度升高而增强,而枝和干是距离叶片最近的器官,其相比地下器官优先被分配到¹⁵N,所以¹⁵N 吸收量随浓度变化规律和叶片基本保持一致,刘庆倩等^[34] 利用持续性熏气法研究的结论也支持此结果。氮沉降是由于大气中含氮物质浓度增加引起^[49—51],而本研究利用 NH_4NO_3 气溶胶模拟一场 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件也可看作模拟一场氮沉降事件,经研究一定量范围内的氮沉降利于提高植物光合性能,但过量的氮沉降则会抑制植物的光合性能^[52—54],这与本研究结果不谋而合。其原因是叶片吸收的氮素参与了植物氮循环,植物氮素水平提高促进光合性能提升,达到“以氮促碳”效应^[55—56],此时叶片净光合速率和气孔导度高于正常水平。因此本研究被试植物在受到胁迫浓度逐渐增高且未达到损坏植物气孔的程度时,其叶片光合能力受到提升,气孔打开程度更充分,更多 $\text{PM}_{2.5}$ 被吸收。

从植物地下器官对两种离子¹⁵N 吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关关系来看,虽然不显著,但整体呈负相关,这是因为根据质量守恒定律,植物整株吸收¹⁵N 总量固定不变,地上器官吸收分配量越多,地下器官吸收分配量就越少,因此当地上器官单位质量¹⁵N 吸收和分配量随浓度升高而增多时,地下器官¹⁵N 吸收和分配量就会随浓度升高而减小。本研究结果也有特例,即粗根对 NH_4^+ 的吸收能力与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关关系,这可能因为本研究中针叶树种地下器官生物量相比阔叶明显较少,且地下器官吸收能力相比地上器官较低,因此地下器官 NH_4^+ 吸收量低至无法改变各器官吸收能力的分配格局,也可能由于不同树种不同器官对氮源喜好不同造成。

本研究中所有器官对两种离子的分配律与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相关性不显著,因为各器官¹⁵N 分配律不仅依附于吸收能力强弱,更依附于其生物量多少,且器官吸收能力会随 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高而增强,但生物量不会随浓度变化而变化,因此器官¹⁵N 分配律与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不相关这一结果合理。忽略相关性是否显著,植物对两种离子分配格局受 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响存在差异可能是 NH_4NO_3 与水发生化学反应导致。当箱内水分积累到一定程度,叶片会附着一层水膜, NH_4NO_3 会溶于水膜中形成 NO_3^- ,再由叶片气孔进入细胞^[57]。

3.3 不同植物¹⁵N 吸收能力差异

之前研究大多都是通过水洗法获取不同树种单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量来量化植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸附能力^[58],但是吸附能力强的植物未必吸收能力强,吸收能力强的植物意味着它能最大化地将 $\text{PM}_{2.5}$ 中无机成分 NH_4^+ 和 NO_3^- 转化成自身生长发育所需的能量,因为氮元素是植物生长必需营养元素之一,而且叶片氮含量与光合速率之间存在很强的相关性^[59]。本研究不同树种对器官 ^{15}N 吸收能力和分配率均有显著影响,说明各树种对两种离子叶片吸收能力和传输给其他器官效率存在差异,这可能是不同树种生理生化性状不同导致,如光合性状(植物净光合速率(P_n))、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)等)^[60-61]和酶活性(超氧化物歧化酶(SOD))、可溶性蛋白含量(SP)和硝酸还原酶(NR)等)^[62]。

本研究通过整株单位质量 ^{15}N 吸收量量化了不同树种在一次 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件过程中对两种离子的吸收能力,发现旱柳和油松对两种离子的整株单位质量吸收量显著大于其他树种($P<0.05$),银杏和栎树对 NH_4^+ 的整株吸收能力明显高于其对 NO_3^- 的整株吸收能力,白皮松和国槐对 NO_3^- 的整株吸收能力明显高于其对 NH_4^+ 的整株吸收能力,且银杏和栎树对 NH_4^+ 的整株吸收能力高于白皮松和国槐,白皮松和国槐对 NO_3^- 的整株吸收能力高于银杏和栎树。说明植物不仅对两种离子的整株吸收能力具有偏好性,且不同植物对两种离子的整株吸收能力具有差异性,这是由植物不同性状及植物对两种离子的吸收的偏好性所致^[63]。关于植物不同性状,本研究旱柳和油松相比其他植物至少具有以下 4 种性状之一,即较小根冠比、粗细根生物量比和较大枝、干生物量比,这些植物性状利于其吸收更多 NH_4^+ 和 NO_3^- 。除植物性状外,叶片疏水性也影响着水溶性组分进入叶片肉细胞^[64],这可能也是不同树种之间对水溶性无机盐吸收能力不同原因之一;此外,叶表微观形态特征也同样影响植物叶片吸收水溶性无机盐能力^[35, 65],如较厚的角质层不利于叶片对溶质吸收^[66]。

针对植物对不同氮素偏好性,早期研究发现不同离子电荷不同且其营养特点不同^[59],植物经过长期进化会逐渐对某种形态氮素产生偏好,这是由植物对不同氮素吸收能力不同所影响^[67]。此外,对不同土壤适应性存在差异的植物对氮素的喜好也不同,更适应碱性土壤的植物相对更喜好 NO_3^- ^[68]。

4 结论

(1) 植物不同器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收能力存在差异。

植物器官对 NH_4^+ 的单位质量吸收量均值整体表现为叶片($0.49 \mu\text{g/g}$)>枝($0.43 \mu\text{g/g}$)>干($0.29 \mu\text{g/g}$)>细根($0.04 \mu\text{g/g}$)>粗根($0.01 \mu\text{g/g}$),对 NO_3^- 表现为叶片($0.35 \mu\text{g/g}$)>枝($0.30 \mu\text{g/g}$)>干($0.09 \mu\text{g/g}$)>细根($0.04 \mu\text{g/g}$)>粗根($0.02 \mu\text{g/g}$);阔叶树种吸收能力强于针叶树种。3 种 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下各器官 ^{15}N 吸收能力排序基本不变,不同树种同一器官对两种离子吸收能力存在一定差异。

(2) 植物不同器官对 NH_4^+ 和 NO_3^- 分配率存在差异。

植物器官对 NH_4^+ 的分配率均值整体表现为叶片(43.64%)>干(31.64%)>枝(21.70%)>细根(1.62%)>粗根(1.40%),对 NO_3^- 表现为叶片(54.44%)>枝(22.36%)>干(13.39%)>粗根(5.97%)>细根(3.84%)。3 种浓度下所有器官 ^{15}N 分配格局基本一致,不同树种同一器官 ^{15}N 分配率存在一定差异。

(3) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、树种和植物性状对植物不同器官吸收或分配 ^{15}N 存在一定影响。

不同浓度、树种及二者交互作用显著影响各器官 ^{15}N 吸收能力和分配率($P<0.01$),其中地上器官吸收能力随浓度升高而增加($P<0.05$),地下器官吸收能力受 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关联程度较弱;所有器官 ^{15}N 分配率与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关联程度较弱。

较小根冠比、粗细根生物量比和较大枝生物量比这些植物性状有利于吸收 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ ;较小根冠比、粗细根生物量比和较大干生物量比这些植物性状利于吸收 NO_3^- ,比叶面积与植物吸收两种离子 ^{15}N 的能力关联程度较弱。

参考文献(References):

[1] Health Effects Institute. Global Health Impacts of Air Pollution. State of Global Air 2019, 2019.

- [2] Health Effects Institute. Global Health Impacts of Air Pollution. State of Global Air 2020, 2020.
- [3] Hutsemékers V, Mouton L, Westenbohm H, Collart F, Vanderpoorten A. Disentangling climate change from air pollution effects on epiphytic bryophytes. *Global Change Biology*, 2023, 29(14): 3990-4000.
- [4] Saini P, Sharma M. Cause and Age-specific premature mortality attributable to PM_{2.5} Exposure; an analysis for Million-Plus Indian cities. *Science of the Total Environment*, 2019, 710: 135230.
- [5] Shi Y S, Zhu Y, Gong S Y, Pan J H, Zang S Y, Wang W, Li Z Q, Matsunaga T, Yamaguchi Y, Bai Y B. PM_{2.5}-related premature deaths and potential health benefits of controlled air quality in 34 provincial cities of China during 2001-2017. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 97: 106883.
- [6] Health Effects Institute. Global Health Impacts of Air Pollution. State of Global Air 2020, 2020.
- [7] Wang S J, Zhou C S, Wang Z B, Feng K S, Hubacek K. The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142(4): 1800-1809.
- [8] Perez P, Menares C, Ramírez C. PM_{2.5} forecasting in Coyhaique, the most polluted city in the Americas. *Urban Climate*, 2020, 32: 100608.
- [9] Badach J, Dymnicka M, Baranowski A. Urban vegetation in air quality management; a review and policy framework. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1258.
- [10] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 129-138.
- [11] Zhai C, Bao G D, Zhang D, Sha Y H. Urban forest locations and patch characteristics regulate PM_{2.5} mitigation capacity. *Forests*, 2022, 13(9): 1408.
- [12] Lee A, Jeong S, Joo J, Park C R, Kim J, Kim S. Potential role of urban forest in removing PM_{2.5}: a case study in Seoul by deep learning with satellite data. *Urban Climate*, 2021, 36(10): 100795.
- [13] Li K M, Li C L, Hu Y M, Xiong Z P, Wang Y H. Quantitative estimation of the PM_{2.5} removal capacity and influencing factors of urban green infrastructure. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161476.
- [14] Manes F, Marando F, Capotorti G, Blasi C, Salvatori E, Fusaro L, Ciancarella L, Mircea M, Marchetti M, Chirici G, Munafò M. Regulating Ecosystem Services of forests in ten Italian Metropolitan Cities: Air quality improvement by PM₁₀ and O₃ removal. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 425-440.
- [15] Du J, Zhang X D, Huang T, Gao H, Mo J Y, Mao X X, Ma J M. Removal of PM_{2.5} and secondary inorganic aerosols in the North China Plain by dry deposition. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2312-2322.
- [16] Irga P J, Paull N J, Abdo P, Torpy F R. An assessment of the atmospheric particle removal efficiency of an in-room botanical biofilter system. *Building and Environment*, 2017, 115: 281-290.
- [17] Yin Z C, Zhang Y J. Climate anomalies contributed to the rebound of PM_{2.5} in winter 2018 under intensified regional air pollution preventions. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138514.
- [18] Abhijith K V, Kumar P. Quantifying particulate matter reduction and their deposition on the leaves of green infrastructure. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114884.
- [19] Chen B, Li S N, Yang X B, Lu S W, Wang B, Niu X. Characteristics of atmospheric PM_{2.5} in stands and non-forest cover sites across urban-rural areas in Beijing, China. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(2): 867-883.
- [20] Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1176-1185.
- [21] Lu S W, Yang X B, Li S N, Chen B, Jiang Y, Wang D, Xu L. Effects of plant leaf surface and different pollution levels on PM_{2.5} adsorption capacity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 34: 64-70.
- [22] Mariën B, Mariën J, Nguyen X H, Nguyen T C, Nguyen V S, Samson R. Particulate matter accumulation capacity of plants in Hanoi, Vietnam. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 1079-1088.
- [23] Shao F, Wang L H, Sun F B, Li G, Yu L, Wang Y J, Zeng X R, Yan H, Dong L, Bao Z Y. Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 939-951.
- [24] Mori J, Sæbø A, Hanslin H M, Teani A, Ferrini F, Fini A, Burchi G. Deposition of traffic-related air pollutants on leaves of six evergreen shrub species during a Mediterranean summer season. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 264-273.
- [25] He C, Qiu K Y, Alahmad A, Pott R. Particulate matter capturing capacity of roadside evergreen vegetation during the winter season. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 48: 126510.
- [26] 是怡芸. 南京常见绿化树种滞留 PM_{2.5}等大气颗粒物的效应研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [27] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 叶片表面粗糙度对颗粒物滞纳能力及洗脱特征的影响. *水土保持学报*. 2015, 29(4): 110-115.
- [28] Sgrigna G, Baldacchini C, Dreveck S, Cheng Z, Calfapietra C. Relationships between air particulate matter capture efficiency and leaf traits in

- twelve tree species from an Italian urban-industrial environment. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137310.
- [29] Zhang R, Ma K M. The impact of climate factors on airborne particulate matter removal by plants. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127559.
- [30] Gao P P, Xue P Y, Dong J W, Zhang X M, Sun H X, Geng L P, Luo S X, Zhao J J, Liu W J. Contribution of PM_{2.5}-Pb in atmospheric fallout to Pb accumulation in Chinese cabbage leaves via stomata. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 407: 124356.
- [31] Takahashi M, Morikawa H. Nitrate, but not nitrite, derived from nitrogen dioxide accumulates in Arabidopsis leaves following exposure to ¹⁵N-labeled nitrogen dioxide. *Plant Signaling & Behavior*, 2019, 14(2): 1559579.
- [32] Zhang Y, Li Z Q, Cuesta J, Li D H, Wei P, Xie Y S, Li L. Aerosol column size distribution and water uptake observed during a major haze outbreak over Beijing on January 2013. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15(3): 945-957.
- [33] Guo W, Long C K, Zhang Z Y, Zheng N J, Xiao H Y, Xiao H W. Seasonal control of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} from Nanning, a subtropical monsoon climate city in southwestern China. *Atmosphere*, 2019, 11(1): 5.
- [34] 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): 6541-6548.
- [35] 石婕, 刘庆倩, 安海龙, 曹学慧, 刘超, 尹伟伦, 郭惠红. 应用¹⁵N 示踪法研究两种杨树叶片对 PM_{2.5} 中 NH₄⁺ 的吸收. *生态学杂志*. 2014, 33(6): 1688-1693.
- [36] 中国统计年鉴编辑委员会. 中国统计年鉴 2021. 中国统计出版社, 2022.
- [37] 黄达峰, 罗修泉, 李喜斌, 邓中国. 同位素质谱技术与应用. 北京: 化学工业出版社, 2006: 296-299.
- [38] Kim J J, Park J, Jung S Y, Lee S J. Effect of trichome structure of Tillandsia usneoides on deposition of particulate matter under flow conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122401.
- [39] Yin S, Lyu J Y, Zhang X Y, Han Y J, Zhu Y H, Sun N X, Sun W, Liu C J. Coagulation effect of aero submicron particles on plant leaves: Measuring methods and potential mechanisms. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113611.
- [40] Chen D L, Yin S, Zhang X Y, Lyu J Y, Zhang Y R, Zhu Y H, Yan J L. A high-resolution study of PM_{2.5} accumulation inside leaves in leaf stomata compared with non-stomatal areas using three-dimensional X-ray microscopy. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158543.
- [41] Cui Y Q, He M Q, Liu D T, Liu J X, Liu J, Yan D W. Intercellular communication during stomatal development with a focus on the role of symplastic connection. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(3): 2593.
- [42] Hu Y B, Bellaloui N, Tigabu M, Wang J H, Diao J, Wang K, Yang R, Sun G Y. Gaseous NO₂ effects on stomatal behavior, photosynthesis and respiration of hybrid poplar leaves. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2015, 37(2): 39.
- [43] 司建华, 冯起, 鱼腾飞, 赵春彦. 植物夜间蒸腾及其生态水文效应研究进展. *水科学进展*. 2014, 25(6): 907-914.
- [44] Eichert T, Fernández V. Uptake and release of elements by leaves and other aerial plant parts//Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Amsterdam: Elsevier, 2012: 71-84.
- [45] 顾曼如, 束怀瑞, 周宏伟. 苹果氮素营养研究Ⅲ. 根外追¹⁵N 及其吸收、运转特性. *园艺学报*, 1985, (2): 89-94.
- [46] Nagai M, Ohnishi M, Uehara T, Yamagami M, Miura E, Kamakura M, Kitamura A, Sakaguchi S I, 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.
- [47] Bortolazzi A, Da Ros L, Rodeghiero M, Tognetti R, Tonon G, Ventura M. The canopy layer, a biogeochemical actor in the forest N-cycle. *Science of the Total Environment*, 2021, 776: 146024.
- [48] Pan Z Y. Studies on characteristics of absorption, distribution and utilization of different ¹⁵N-labeled fertilizers in rubber tree seedlings [D]. Hainan: Hainan University, 2020.
- [49] Mooney H A, Vitousek P M, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *Science*, 1987, 238(4829): 926-932.
- [50] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Technical report: human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737.
- [51] Kaiser J. Environmental policy. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb. *Science*, 2001, 294(5545): 1268-1269.
- [52] Clement J M A M, Boer M D, Venema J H, Hasselt P R V. There is no direct relationship between N-status and frost hardness in needles of NH₃-exposed Scots pine seedlings. *Phyton; annales rei botanicae*, 2000, 40(3): 21-33.
- [53] Nakaji T, Fukami M, Dokiya Y, Izuta T. Effects of high nitrogen load on growth, photosynthesis and nutrient status of Cryptomeria japonica and Pinus densiflora seedlings. *Trees*, 2001, 15(8): 453-461.
- [54] Nakaji T, Takenaga S, Kuroha M, Izuta T. Photosynthetic response of pinus densiflora seedlings to high nitrogen load. *Environ*, 2002, 9(4): 269-282.

- [55] Dail D B, Hollinger D Y, Davidson E A, Fernandez I, Sievering H C, Scott N A, Gaige E. Distribution of nitrogen-15 tracers applied to the canopy of a mature spruce-hemlock stand, Howland, Maine, USA. *Oecologia*, 2009, 160(3): 589-599.
- [56] Liu H Z, Zheng F R, Zhao S J. Effects of exogenous nitrogen nutrition of roots on photosynthetic characteristics of leaves in wheat under heat stress. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 52-56.
- [57] Wang Y, Teng Z Y, Zhang X L, Che Y H, Sun G Y. Research progress on the effects of atmospheric nitrogen dioxide on plant growth and metabolism. *The Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 316-324.
- [58] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 249-253.
- [59] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, Melillo J M. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 1989, 39(6): 378-386.
- [60] 高昆, 李兴基. 颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 对 4 种针叶植物光合特性的影响. *天津农业科学*, 2023, 29(11): 11-18.
- [61] 杨静慧, 罗虹, 张殷殷, 冀馨宁, 周强, 赵立伟. 北方冬季 4 种常绿植物叶片光合特性与大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系. *天津农学院学报*, 2018, 25(1): 29-32.
- [62] 李佳赢, 房佳兴, 李少宁, 王梦雪, 张俊杰, 赵娜, 鲁绍伟. 北京典型绿化树种对氮氧化物的抗性. *东北林业大学学报*, 2024, 52(2): 84-90.
- [63] 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.
- [64] Fernandez V, Eichert T. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves; current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2009, 28(1/2): 36-68.
- [65] Kerstiens G. Cuticular water permeability and its physiological significance. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(12): 1813-1832.
- [66] Richardson A, Wojciechowski T, Franke R, Schreiber L, Kerstiens G, Jarvis M, Fricke W. Cuticular permeance in relation to wax and cutin development along the growing barley (*Hordeum vulgare*) leaf. *Planta*, 2007, 225(6): 1471-1481.
- [67] Turnbull M H, Schmidt S, Erskine P D, Richards S, Stewart G R. Root adaptation and nitrogen source acquisition in natural ecosystems. *Tree Physiology*, 1996, 16(11-12): 941-948.
- [68] Nelson L E, Selby R. The effect of nitrogen sources and iron levels on the growth and composition of Sitka spruce and Scots pine. *Plant and Soil*, 1974, 41(3): 573-588.