

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230445

氮添加对华北落叶松根际与非养分的影响

李汝振¹, 李 雯¹, 杨 柳¹, 卢金平², 马娇娇², 许中旗¹, 贾彦龙^{1*}

(1. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000; 2. 河北省木兰围场国有林场, 河北 围场 068450)

摘要: [目的] 大气氮沉降对森林根际与非根际土壤养分有重要影响。华北地区是我国氮沉降高值区之一, 然而目前关于氮沉降对该地区森林土壤养分影响的阈值及其是否引起其它养分限制还不清楚。[方法] 本研究以河北省木兰围场国有林场的华北落叶松人工林为研究对象, 通过多水平氮添加实验 (0、5、10、20、40、80、160 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹), 分析氮添加对根际和非根际土壤在全量养分、速效养分及其生态化学计量的差异影响, 旨在揭示氮添加对华北落叶松人工林根际效应的影响。[结果] 研究表明: 1) 根际土壤有机碳 (SOC)、总氮 (TN)、硝态氮 (NO₃⁻-N) 和有效氮 (AN) 含量随氮添加水平呈上升趋势, 且都在氮添加为 80 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时达到最高值, 与对照组相比增加了 39.55%、36.27%、56.69%、44.02%。2) 非根际土壤 NO₃⁻-N 在氮添加为 160 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时达到最大, 与对照组存在显著性差异, 不同氮添加水平下 SOC、TN、TP 含量等均无显著变化。3) 随着氮添加水平的增加, 根际土壤的 C:P、N:P 呈上升趋势, 非根际土壤的 C:P、N:P 呈下降趋势。4) 相对于对照组, 氮添加后土壤 SOC、TN、NO₃⁻-N、AN、AP、C:P、N:P 的根际效应呈增加趋势。[结论] 本研究表明, 氮添加会增强根际效应, 提高华北落叶松人工林根际土壤 SOC、TN、NO₃⁻-N、AN 的含量, 且阈值均在 80 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹, 而且氮添加会改变土壤磷元素平衡, 华北落叶松人工林生长未来可能会面临土壤磷限制。本研究可为大气氮沉降或施肥措施下华北落叶松人工林的养分调控提供理论和科学依据。

关键词: 氮添加; 土壤养分; 化学计量学; 根际效应; 华北落叶松人工林

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)05-0195-10

自工业革命以来, 工业废气的大量排放以及农田化肥的过度使用, 导致全球氮沉降量持续增加^[1]。目前中国成为了全世界目前活性氮排放量最多的国家, 其中我国华北地区的总氮沉降平均通量已达到 54.5 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹^[2]。氮沉降的增加不仅会影响植物光合作用, 刺激植物生长^[3], 还会对土壤养分循环造成重要影响^[4]。根据植物根系对土壤的影响可将土壤分为根际土壤和非根际土壤^[5]。根际土壤通常是指植物细根周围 2 mm 范围内直接受到植物根系密切影响的那一部分土壤, 不同种类植物根际范围略有差异^[6]。研究表明, 根际土壤是植物细根和土壤之间接触最密切、养分物质交换最频

繁的区域^[7], 具有重要研究价值。氮作为森林土壤中的主要限制元素, 氮的添加会改变植物根系养分、生长及根际活动, 从而影响根际土壤的养分特征以及与非根际土壤的差异^[8-9]。因此, 在氮沉降加剧的背景下, 研究根际与非根际土壤的养分变化具有重要意义。

研究表明, 根际土壤养分含量绝大多数情况下均高于非根际土壤, 存在根际效应^[5]。林莉在亚热带的木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) 次生林中研究发现根际土壤有机碳 (SOC) 含量均高于非根际土壤^[10]。Toberman 等也得出相似结论, 热带雨林中根际土壤 SOC 和 TN 含量均高于

收稿日期: 2023-11-16 修回日期: 2024-01-22

基金项目: 国家自然科学基金 (31700377); 河北省自然科学基金 (C2018204096)

* 通讯作者: 贾彦龙, 博士, 副教授, 主要研究方向: 森林生态学教学和研究。E-mail: Email: jyl198620@163.com

非根际土壤^[11]。氮添加对土壤养分根际效应影响有所差异。陈杰在湿地松 (*Pinus elliottii* Engelman.) 人工林的研究中发现, 在低氮 (50 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹) 和高氮 (100 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹) 不同氮添加水平下, 根际土壤的 C、N、P 含量均高于非根际土壤^[12]。景航研究发现: 氮添加会提高根际土壤的 NO₃⁻-N 含量, 降低 TP 含量, 而 SOC、TN 和 NH₄⁺-N 含量均呈增加后降低的趋势, 低氮 (30 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹) 处理提高了而高氮 (90 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹) 处理却降低了非根际土壤 SOC、TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量^[13]。但也有研究发现, 长期施氮 (100 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹) 处理下, 会增加根际土壤 TN 和 TP 含量^[10], 或氮添加均可以提高根际和非根际土壤 SOC、TN 含量和 N:P、C:P, 降低 TP 含量^[14]。目前, 关于氮添加对根际和非根际土壤养分含量、根际效应^[12,15] 及对土壤 C、N、P 生态化学计量的影响^[16-18] 的研究存在不同的结论, 这可能与不同的施氮量有关, 也就是生态系统过程对氮输入量存在非线性关系。然而, 目前对于森林根际效应对氮沉降的响应阈值及其超过阈值后是否会引起其它养分限制还并不清楚。

华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr.) 是燕山北部山地人工林的主要树种, 具有耐寒耐旱特性, 是优良的速生用材树种, 在地区碳平衡中具有重要作用。本研究以河北围场地区的华北落叶松人工林为研究对象, 通过多梯度的氮添加实验, 分析氮添加对根际和非根际土壤养分及其根际效应的影响。本研究要解决的问题是: 1) 华北落叶松人工林根际和非根际土壤养分对氮添加响应

是否存在阈值, 阈值是多少; 2) 氮添加是否会造成土壤其它养分元素失衡, 从而导致其它养分对植物生长的限制。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

河北省承德市围场县孟滦林场 (116°32'~118°1' E, 41°35'~42°40' N), 地处大兴安岭余脉、内蒙古高原和燕山余脉交汇处、滦河上游地区, 地势西北高、东南低, 海拔 750~2 067 m。该地区属于半湿润半干旱的过渡地区, 冬季酷寒干燥, 夏季无暑热, 且冬长春秋短, 年均降水 445 mm, 年均温 3.3 ℃, 雨热同期; 1 月平均气温 -13.2 ℃, 极端最低气温 -42.9 ℃, 7 月平均气温 20.7 ℃, 降水多集中在 7、8 月。土壤类型主要有棕壤、褐土、灰色森林土、黑土等。

1.2 样地设置和取样方法

2019 年 8 月开始, 在木兰围场国有林场孟滦分场, 以华北落叶松人工林为研究对象进行试验。该林位于山坡北部, 背阴坡约为 15°, 土壤类型为棕壤土, 当时均是植苗造林, 苗龄 2 a, 现在林龄为 30 a, 林地背景信息见表 1^[19], 详细信息可见本研究的前期进展。本试验采用随机区组设计的方法, 开展不同水平的氮添加实验, 在山坡等高线一字排开设置 28 块 20 m × 20 m 的样地, 相邻样地间隔 10 m, 设计了 7 个水平, 每个水平 4 个重复, 每个重复为一个小区, 每个小区 7 个水平的氮添加样地随机排列。本研究通过雨量计法测定该地区的大气湿沉降通量, 发现该地区年湿氮沉降通量

表 1 氮添加样地本底数据 (平均值 ± 标准误)

Table 1 Background data of nitrogen added sample plots (average value ± standard error)

氮添加量 N addition/(kg N·ha ⁻¹ ·yr ⁻¹)	密度/(株·ha ⁻¹) Density	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	冠幅 Crown width/m
0	1631.25 ± 79.30a	11.86 ± 0.78a	8.62 ± 0.44a	1.49 ± 0.05a
5	1543.75 ± 173.62a	12.30 ± 0.80a	8.73 ± 0.28a	1.66 ± 0.09a
10	1456.25 ± 119.62a	12.67 ± 0.43a	9.19 ± 0.18a	1.50 ± 0.04a
20	1493.75 ± 156.25a	12.15 ± 0.63a	9.27 ± 0.16a	1.49 ± 0.07a
40	1425.00 ± 90.71a	12.84 ± 0.38a	9.56 ± 0.18a	1.58 ± 0.08a
80	1362.50 ± 33.07a	12.68 ± 0.24a	9.29 ± 0.16a	1.53 ± 0.04a
160	1518.75 ± 141.56a	12.40 ± 0.44a	9.41 ± 0.36a	1.50 ± 0.08a

注: 同一列中字母不同表示不同氮添加水平间具有显著差异 ($p < 0.05$)
Note: Different letters in the same column indicate significant differences among different nitrogen addition gradients ($p < 0.05$)

为 $5.03 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, 其中 88% 沉积量集中于生长季 5 月—10 月。依据该地区氮沉降的背景值, 本试验设定 7 个处理的氮添加量分别为 0、5、10、20、40、80、160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, 其中氮添加量为 0 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的是对照组 (CK)。在生长季 (5—10 月), 每月施肥一次, 施肥种类为尿素。施肥时将相应质量的尿素溶于 40 L 水中, 均匀喷洒于样地中, 对照样地喷洒等量清水。每次喷洒量相当于 1 mm 降雨量, 对土壤湿度无明显影响。

于 2021 年 8 月中旬采集华北落叶松人工林根际和非根际土壤, 在样地进行表层土壤 (0~10 cm) 取样。取样方法为五点取样, 每个取样点面积为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 采用“抖落法”, 将挖出的土壤与植物根系分离, 将根系用力抖动, 直至附着在根系上的土壤厚度约 $< 2 \text{ mm}$, 抖落的土壤与分离的土壤为非根际土壤, 未抖落的附着在根系上 (厚度 $< 2 \text{ mm}$) 的土壤用毛刷刷下为根际土壤, 根际和非根际土壤各取样 28 个, 共 56 个样。所有土壤样品过 2 mm 筛后分为两份: 一份自然风后置于自封袋中, 带回实验室用于土壤 SOC、TN 等含量测定, 另一份置于自封袋于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存用于土壤无机氮等含量测定。

1.3 测定方法

土壤碳 (C)、氮 (N) 和磷 (P) 是必要的土壤养分^[20], 其中铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、有效氮 (AN) 和有效磷 (AP) 可以快速直观反映出土壤中 N、P 养分的供需状况^[21], 且会受到外源氮输入的影响, 所以本研究土壤养分的测定的指标包括土壤有机碳 (SOC)、总氮 (TN)、总磷 (TP)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AN、AP。土壤 SOC 采用重铬酸钾氧化法测定, 土壤 TN 采用全自动凯氏定氮仪测定, 土壤 TP 采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提法测定。土壤 AN 为铵态氮与硝态氮总量之和。土壤 AP 采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 软件对测量数据进行记录处理; 运用 SPSS 26.0 统计分析软件采用单因素方差分析 (ONE-WAY ANOVA) 对不同氮添加水平处理下全量养分、速效养分、化学计量、根际效应

进行 LSD 最小差异显著性分析, 采用独立样本 T 检验进行根际与非根际间土壤养分显著性分析; 运用 Origin 2022 对根际和非根际土壤各养分结果绘制柱状图, 数据柱状图用平均值、标准误和显著性绘制, 化学计量采用养分含量比, 并标注显著性 ($p < 0.05$); 根际效应 (R/NR) 为根际养分含量 (R) / 非根际养分含量 (NR)。

2 结果与分析

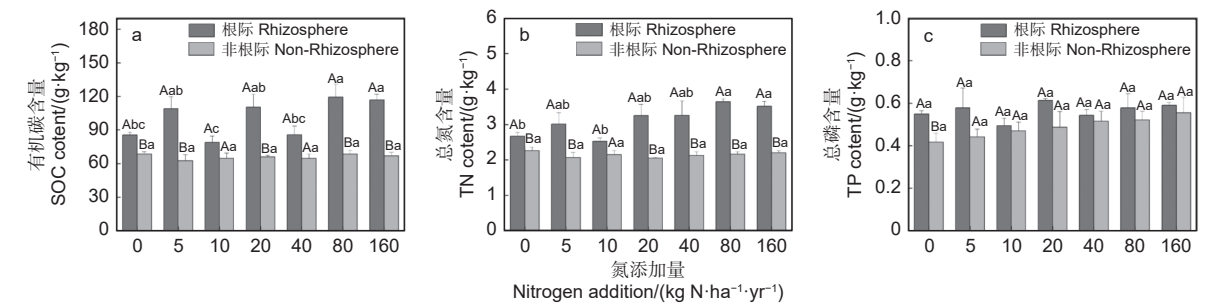
2.1 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤全量养分的影响

2.1.1 根际与非根际土壤全量养分含量的变化
氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤 SOC、TN、TP 的影响如图 1 所示。

在氮添加处理下, 根际土壤 SOC 含量在 $85.56 \sim 119.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的提高, 根际土壤 SOC 含量有增加趋势, 氮添加量为 80、160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组有显著性差异 ($p < 0.05$); 非根际土壤 SOC 含量范围在 $62.53 \sim 68.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的提高, SOC 含量变化不显著。在氮添加处理下, 根际土壤 SOC 含量均高于非根际土壤, 除氮添加量为 10、40 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 外, 根际和非根际土壤 SOC 含量均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

在氮添加处理下, 根际土壤 TN 含量在 $2.52 \sim 3.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的提高, TN 含量有增加趋势, 氮添加量为 80、160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$); 非根际土壤 TN 含量在 $2.06 \sim 2.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的提高, TN 含量变化不显著 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下, 根际土壤 TN 含量均高于非根际土壤, 除氮添加量为 10 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 外, 根际和非根际土壤 TN 含量均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

在氮添加处理下, 根际土壤 TP 含量在 $0.49 \sim 0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的提高, TP 含量变化不显著 ($p < 0.05$); 非根际土壤 TP 含量在 $0.42 \sim 0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的提高, TP 含量有增加趋势, 未达到显著水平 ($p < 0.05$)。根际土壤 TP 含量均高于非根际土壤, 对照组根际和非根际土壤 TP 含量存在显著差异 ($p < 0.05$), 其它氮添加水平下, 根际与非



注：有机碳 (a)，总氮 (b)，总磷 (c)；不同大写字母表示同一氮添加水平下根际与非根际间全量养分差异显著，不同小写字母分别表示根际间、非根际间在不同氮添加水平下全量养分差异显著 ($p < 0.05$)

Notes: Organic carbon (a), total nitrogen (b), total phosphorus (c); Different uppercase letters indicated significant differences in total nutrients between rhizosphere and non-rhizosphere under the same nitrogen addition gradient, while different lowercase letters indicated significant differences in total nutrients between rhizosphere and non-rhizosphere under different nitrogen addition gradients ($p < 0.05$)

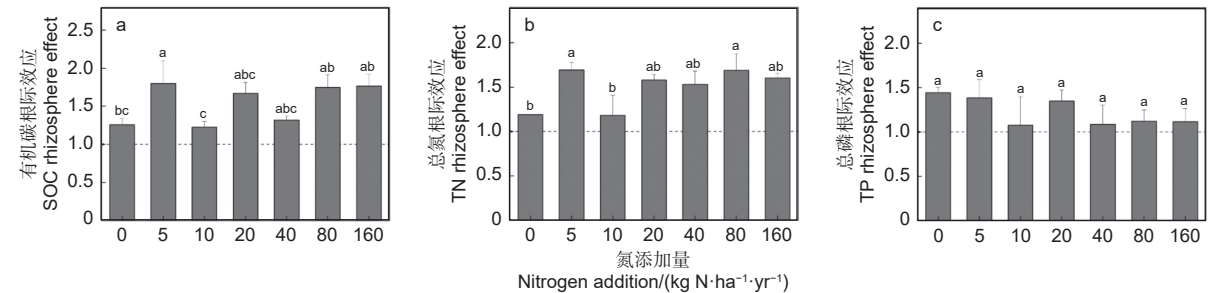
图 1 不同氮添加水平下华北落叶松根际与非根际土壤全量养分含量的变化

Fig. 1 Changes in total nutrient content in rhizosphere and non rhizosphere soils of North China larch under different nitrogen addition gradients

根际土壤 TP 含量差异性不显著。

2.1.2 土壤全量养分的根际效应 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤 SOC、TN、TP 的根际效应影响如图 2 所示。在氮添加处理下，土壤 SOC 的 R/NR 在 1.23~1.87 范围内，随着氮添加水平的提高，土壤 SOC 的 R/NR 有增加趋势，氮添加量为 5 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时，与对照组有显著性

差异 ($p < 0.05$)；土壤 TN 的 R/NR 在 1.18~1.69 范围内，随着氮添加水平的提高，土壤 TN 的 R/NR 呈先增加后降低趋势，氮添加量为 5、80 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时，与对照组有显著性差异 ($p < 0.05$)；土壤 TP 的 R/NR 在 1.08~1.44 范围内，随着氮添加水平的提高，土壤 TP 的 R/NR 没有显著变化 ($p < 0.05$)。



注：有机碳 (a)，总氮 (b)，总磷 (c)；不同小写字母表示不同氮添加水平下全量养分根际效应差异显著 ($p < 0.05$)

Notes: Organic carbon (a), total nitrogen (b), total phosphorus (c); Different lowercase letters indicated significant differences in rhizosphere effects of total nutrients under different nitrogen addition gradients ($p < 0.05$)

图 2 不同氮添加水平下华北落叶松土壤全量养分的根际效应

Fig. 2 Rhizosphere effects of total nutrients in North China larch soil under different nitrogen addition gradients

2.2 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤速效养分的影响

2.2.1 根际与非根际土壤速效养分含量的变化 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、AN、AP 的影响如图 3 所示。

在氮添加处理下，根际土壤 NH₄⁺-N 含量在 12.11~16.24 mg·kg⁻¹ 范围内，随着氮添加水平的提高，NH₄⁺-N 含量呈先降低后增加趋势，氮添加

量为 10 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时，与对照组有显著性差异 ($p < 0.05$)；非根际土壤 NH₄⁺-N 含量范围在 7.80~8.66 mg·kg⁻¹ 范围内，随着氮添加水平的提高没有显著变化 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下，根际土壤 NH₄⁺-N 含量均高于非根际土壤，根际和非根际土壤 NH₄⁺-N 含量有显著性差异 ($p < 0.05$)。

在氮添加处理下，根际土壤 NO₃⁻-N 含量在 46.45~92.83 mg·kg⁻¹ 范围内，随着氮添加水平的

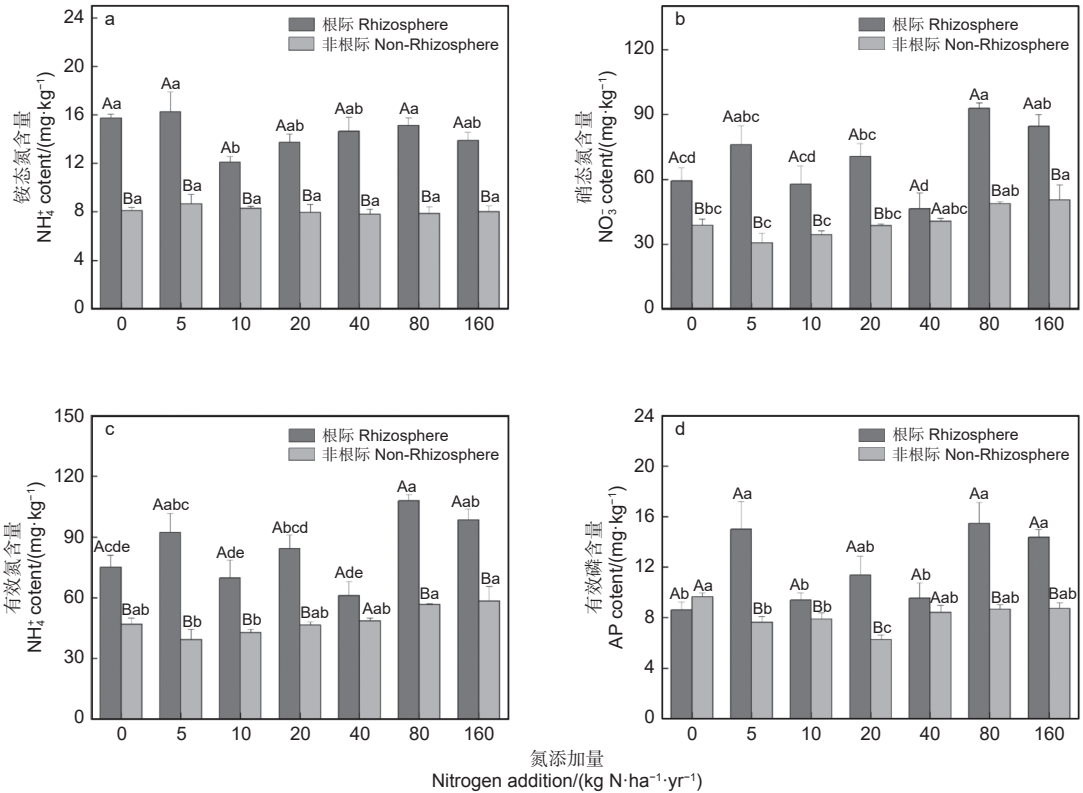


图 3 不同氮添加水平下华北落叶松根际与非根际土壤速效养分含量的变化

Fig. 3 Changes in available nutrient content in rhizosphere and non rhizosphere soils of North China larch under different nitrogen addition gradients

增加, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量整体呈增加趋势, 氮添加量为 80、160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$); 非根际土壤的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量在 46.45~92.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的增加呈先降低后增加的趋势, 氮添加量为 160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下, 根际土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量高于非根际土壤, 除氮添加量为 40 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 外, 根际和非根际土壤的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

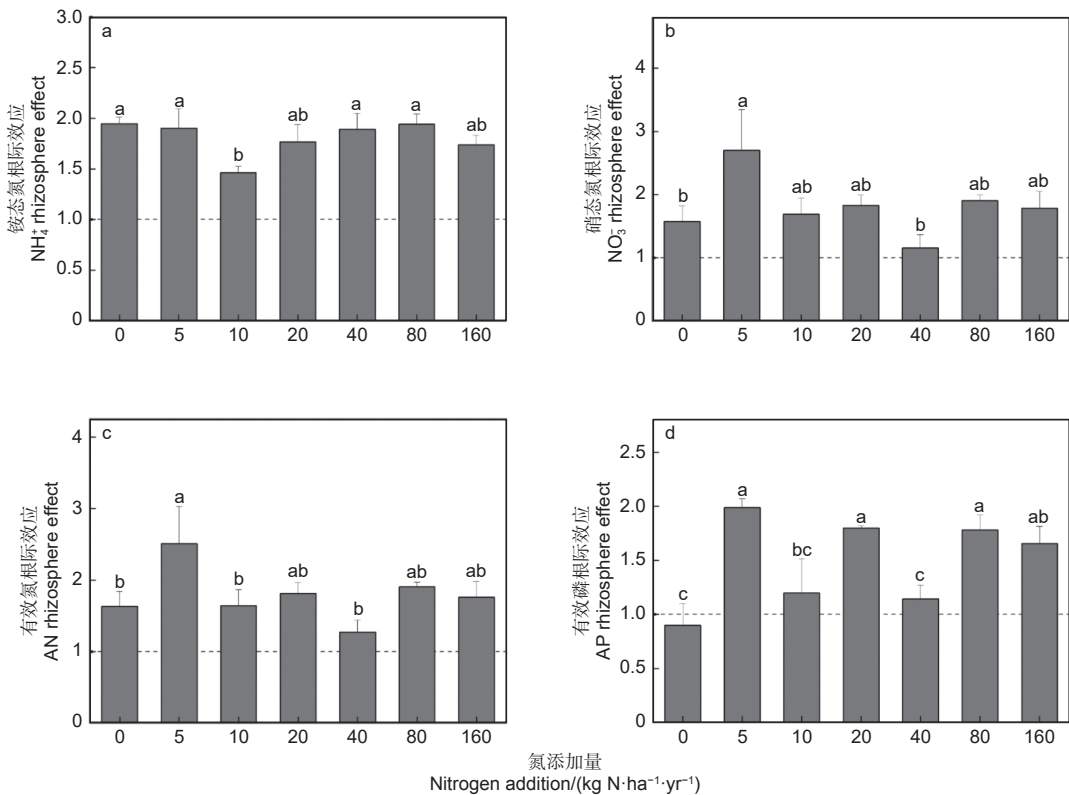
在氮添加处理下, 根际土壤 AN 含量在 61.11~107.97 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的增加, 根际土壤 AN 含量整体呈增加趋势, 氮添加量为 80、160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$); 非根际土壤 AN 含量范围在 39.32~58.41 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水

平的增加呈先降低后增加的趋势, 未达到显著水平 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下, 根际土壤 AN 含量高于非根际土壤, 除氮添加量为 40 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 外, 根际和非根际土壤 AN 含量均存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

在氮添加处理下, 根际土壤 AP 含量在 8.61~15.46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的增加, 根际土壤 AP 含量有增加趋势, 氮添加量为 5、80、160 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$); 非根际土壤 AP 含量在 6.25~9.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内, 随着氮添加水平的增加整体呈降低趋势, 氮添加量为 5、10、20 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下, 根际土壤 AP 含量高于非根际土壤, 除氮添加量为 0、40 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 外, 根际和非根际土壤 AP 含量均存在显著差异 ($p < 0.05$)。

2.2.2 土壤速效养分的根际效应 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、

AN、AP 的根际效应影响如图 4 所示。



注：铵态氮 (a)，硝态氮 (b)，有效氮 (c)，有效磷 (d)；不同小写字母表示不同氮添加水平下速效养分根际效应差异显著 ($p < 0.05$)

Notes: Ammonium nitrogen (a), nitrate nitrogen (b), available nitrogen (c), available phosphorus (d); Different lowercase letters indicated that the rhizosphere effects of available nutrients were significantly different under different nitrogen addition gradients ($p < 0.05$)

图 4 不同氮添加水平下华北落叶松土壤速效养分的根际效应

Fig. 4 Rhizosphere effects of available nutrients in North China larch soil under different nitrogen addition gradients

不同梯度的氮添加处理下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AN、AP 均存在根际效应。在氮添加处理下，土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 R/NR 在 1.46~1.95 范围内，随着氮添加水平的增加，土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的 R/NR 呈先降低后增加趋势，氮添加量为 10 kg $\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时，与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)；土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 R/NR 在 1.16~1.91 范围内，随着氮添加水平的增加，土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 R/NR 呈现先增加后降低趋势，氮添加量为 5 kg $\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时，与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)；土壤 AN 的 R/NR 在 1.27~2.51 范围内，随着氮添加水平的增加，土壤 AN 的 R/NR 呈先增加后降低趋势，氮添加量为 5 kg $\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 时，与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)；土壤 AP 的 R/NR 在 0.90~1.99 范围内，随着氮添加水平的增加，土壤 AP 的

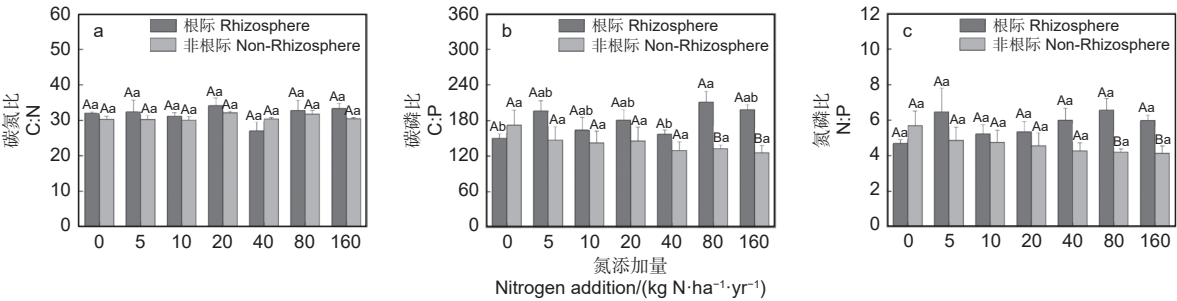
R/NR 整体呈增加趋势，除氮添加量为 10、40 kg $\text{N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ 外，其他氮添加水平下土壤 AP 的 R/NR 均与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.3 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤生态化学计量的影响

2.3.1 根际与非根际土壤养分化学计量的变化 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤 C : N、C : P、N : P 的影响如图 5 所示。

在氮添加处理下，根际土壤 C : N 在 26.99~34.13 范围内，非根际土壤的 C : N 在 30.01~32.05 范围内，随着氮添加水平的增加，根际土壤、非根际土壤 C : N 没有显著变化，且根际与非根际间土壤 C : N 无显著差异 ($p < 0.05$)。

在氮添加处理下，根际土壤 C : P 在 149.79~254.90 范围内，随着氮添加水平的增加，根际土



注: C : N (a), C : P (b), N : P (c); 不同大写字母表示同一氮添加水平下根际与非根际间养分生态化学计量量差异显著, 不同小写字母分别表示根际间、非根际间在不同氮添加水平下土壤养分生态化学计量量差异显著 ($p < 0.05$)

Notes: C : N (a), C : P (b), N : P (c); Different uppercase letters indicated significant differences in nutrient ecological stoichiometry between rhizosphere and non-rhizosphere under the same nitrogen addition gradient, while different lowercase letters indicated significant differences in soil nutrient ecological stoichiometry between rhizosphere and non-rhizosphere under different nitrogen addition gradients ($p < 0.05$)

图 5 不同氮添加水平下华北落叶松根际与非根际土壤养分化学计量的变化

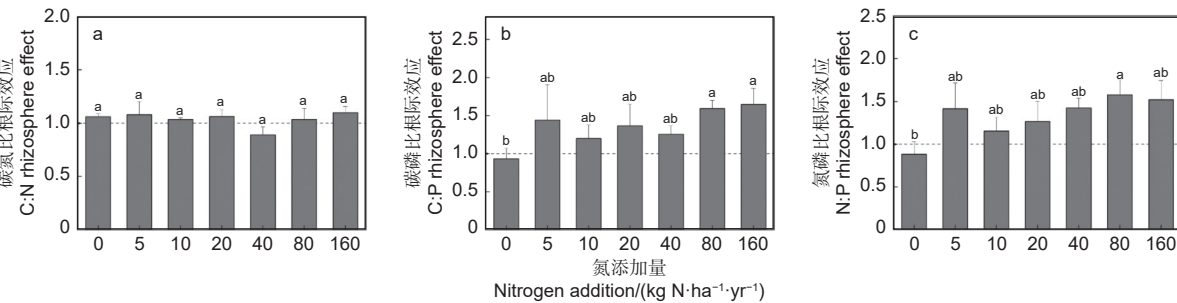
Fig. 5 Changes in nutrient stoichiometry in rhizosphere and non rhizosphere soils of North China larch under different nitrogen addition gradients

壤 C : P 呈先增加后降低趋势, 未达到显著水平 ($p < 0.05$); 非根际土壤 C : P 在 125.26~171.98 范围内, 随着氮添加水平的增加呈降低趋势, 变化不显著 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下, 根际土壤 C : P 均高于非根际土壤, 氮添加量为 80 和 160 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时, 根际与非根际土壤间 C : P 存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

在氮添加处理下, 根际土壤 N : P 在 4.68~6.55 范围内, 随氮添加水平的增加, N : P 整体呈增加趋势, 未达到显著水平 ($p < 0.05$); 非根际

土壤 N : P 在 4.12~5.68 范围内, 随氮添加水平的增加呈降低趋势, 未达到显著水平 ($p < 0.05$)。在氮添加处理下, 除对照组外, 根际土壤 N : P 均高于非根际土壤, 氮添加量为 80 和 160 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时, 根际与非根际土壤间 N : P 存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

2.3.2 土壤养分化学计量的根际效应 氮添加对华北落叶松根际与非根际土壤 C : N、C : P、N : P 的根际效应影响如图 6 所示。



注: C : N (a), C : P (b), N : P (c); 不同小写字母表示不同氮添加水平下土壤养分化学计量的根际效应差异显著 ($p < 0.05$)

Notes: C : N (a), C : P (b), N : P (c); Different lowercase letters indicated significant differences in rhizosphere effects of soil nutrient stoichiometry under different nitrogen addition gradients ($p < 0.05$)

图 6 不同氮添加水平下华北落叶松人工林土壤养分化学计量的根际效应

Fig. 6 Rhizosphere effects of soil nutrient stoichiometry in North China larch plantation under different nitrogen addition gradients

在氮添加处理下, 土壤 C : N 的 R/NR 在 0.89~1.33 范围内, 随着氮添加水平的增加, 土壤 C : N 的 R/NR 没有显著变化。土壤 C : P 的 R/NR 在 0.93~1.89 范围内, 随着氮添加水平的增

加, 土壤 C : P 的 R/NR 整体呈现增加趋势, 氮添加量为 80、160 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)。土壤 N : P 的 R/NR 在 0.88~1.58 范围内, 随着氮添加水平的增加, 土

壤 N : P 的 R/NR 整体呈现增加的趋势, 氮添加量为 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时, 与对照组存在显著性差异 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 氮添加对华北落叶松土壤养分影响的阈值

本研究中, 华北落叶松人工林根际土壤 SOC、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、AN 含量随着氮添加水平呈现先增加后趋于平稳的趋势, 且均在氮添加量为 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时达到最大, 因此本研究认为根际土壤 SOC、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、AN 含量对氮添加量响应阈值为 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。张丹等在黄土丘陵地区设置 0、10、20、40、 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 5 个氮添加水平实验^[22], 结果表明在氮添加 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时 SOC 含量增长最多, 氮添加缓解了根际微生物的氮限制, 促进林下植物生长, 凋落物返还到土壤中的碳增多, 从而使 SOC 含量呈现增加的趋势。同时, 也有研究发现过度氮添加会降低地上植物多样性和生产力, 影响碳输入, 降低 SOC 含量^[23], $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 会发生硝化作用释放 H^+ 降低土壤 pH, 减弱矿物对 SOC 的保护作用从而降低 SOC 含量^[24]。本研究中, 氮添加增加了根际土壤 TN 含量, 这与很多研究结果一致^[25-26]。王昭等在鼎湖山常绿阔叶林设置 0、50、100、150、200 $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 5 个氮添加水平实验^[27], 结果表明在氮添加 $150 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 水平下 TN 含量最高, 显著高于其他处理。本研究中根际土壤 TN 在氮添加 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 水平下含量达到阈值, 继续施氮会减少 TN 含量, 可能是因为在缺氮地区, 氮添加会一定程度上缓解了森林土壤氮限制, 增加土壤氮库, 提高了土壤的 TN 含量^[28], 然而施氮过多会引起土壤酸化, 降低土壤 TN 含量^[29]。李琛琛等在华北落叶松林开展的模拟氮沉降研究发现^[30], 低氮添加会促进 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量增加, 高氮添加促进效果减弱。本研究中, 随着氮添加水平的增加, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量整体呈上升趋势, 且在氮添加 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 水平下含量达到阈值, 说明氮添加对土壤硝化有促进作用, 促进了 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的积累, 然而超过阈值后的氮添加可能因为氮素积累导致根际土壤反硝化作用增强, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 被还原成 N_2O 和 N_2 从土壤中排出^[31], 降低了 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量。与对照组相比, 非根际土壤 SOC、TN 含量在氮添加下

变化并不显著, 这可能与施氮年限较短有关。

3.2 氮添加对华北落叶松土壤磷元素的影响

磷是植物生长的必要元素, 且生态系统碳氮磷循环是耦合在一起发挥作用, 因此, 氮输入会改变森林土壤磷循环, 从而影响植物的生长^[32]。Ren 等在内蒙古荒漠草原进行氮添加试验显示氮添加增加了土壤 AP 含量^[33]。一项热带森林的研究表明, 氮添加会促进植物对磷素的吸收, 刺激了土壤酸性磷酸酶活性, 加速了土壤有机物分解, 从而提高土壤 AP 含量^[34]。本研究中, 在氮添加量为 5、80、 $160 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时显著增加了根际土壤 AP 含量, 且土壤 N : P 的根际效应呈上升趋势。其主要原因可能也是氮添加促进华北落叶松林下植物快速生长, 从而增加对磷元素的获取, 使得根系分泌促进磷转化的酶活性提高, 促进了土壤总磷向有效磷的转化, 最终提高了土壤根际 AP 含量, 但降低土壤 TP 含量, 使得土壤 N : P 的根际效应增强。土壤 N : P 反映了土壤对磷的固持能力, 一定程度体现了土壤养分变化。氮添加刺激植物对磷的需求, 加速磷的转化, 促进磷从土壤系统中输出, 使土壤 TP 含量减低, 造成土壤 N : P 失衡^[35]。植物生长发育需要维持稳定的 N : P^[36], 在持续的氮素输入下, 未来磷素可能会成为限制华北落叶松人工林生长的重要因素。本研究通过分析不同氮添加水平下土壤 AP 和 N : P 根际效应的变化趋势, 预测燕山北部山地华北落叶松在未来大气氮沉降增加或氮施肥情景下可能面临土壤磷元素的限制, 因此, 未来合理添加磷肥是华北落叶松人工林应对外源氮输入的重要手段之一。

4 结论

本研究对燕山北部山地华北落叶松人工林根际与非根际土壤在全量养分、速效养分及生态化学计量在氮添加处理下的变化进行研究分析, 得出结论: 1) 氮添加对根际土壤养分含量影响显著, SOC、TN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、AN 含量随氮添加水平增加呈上升趋势, 且均在氮添加为 $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ 时含量达到阈值。2) 氮添加会改变土壤磷元素平衡, 在未来外源氮输入背景下华北落叶松人工林生长可能会面临土壤磷限制的压力。本研究可为华北落叶松人工林养分管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] LI X B, KAZANCI C, ZHANG J, *et al.* Application of ecological network analysis in nitrogen cycling agroecosystems: Progress and prospects[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(3): 325-332.
- [2] ZHEN W, XIU Y Z, LEI L, *et al.* Spatial and seasonal patterns of atmospheric nitrogen deposition in North China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, , 13(3): 188-194.
- [3] JASON C N, ALAN R T, GERD G, *et al.* Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. *Nature*, 2002, 419(6910): 915-917.
- [4] EMMETT B A, REYNOLDS B, SILGRAM M, *et al.* The consequences of chronic nitrogen additions on N cycling and soil-water chemistry in a Sitka spruce stand, North Wales[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1): 165-175.
- [5] 李国辉. 黄土丘陵区典型植物根际与非根际土壤性质差异的比较研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- [6] HARTMANN A, ROTHBALLER M, SCHMID M, *et al.* Lorenz Hiltner, a pioneer in rhizosphere microbial ecology and soil bacteriology research[J]. *Plant and Soil*, 2008, 312(12): 7-14.
- [7] 宋贤冲, 项东云, 杨中宁, 等. 广西桉树人工林根际土壤微生物群落功能多样性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 58-61.
- [8] PATHAN S I, CECCHERINI M T, PIETRAMELLARA C, *et al.* Enzyme activity and microbial community structure in the rhizosphere of two maize lines differing in N use efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2015, 387(1): 413-424.
- [9] 向雪梅, 德科加, 林伟山, 等. 氮素添加对高寒草甸植物群落多样性和土壤生态化学计量特征的影响 [J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2769-2777.
- [10] 林 莉. 氮磷添加对天童常绿阔叶林根际和非根际土壤碳氮库的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [11] TOBERMAN H, CHEN C R, XU Z H. Rhizosphere effects on soil nutrient dynamics and microbial activity in an Australian tropical lowland rainforest[J]. *Soil Research*, 2011, 49(7): 652-660.
- [12] 陈 杰. 氮磷添加对湿地松人工林根际土壤养分及酶活性的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
- [13] 景 航. 氮添加影响油松林根际和非根际土壤温室气体释放的机制 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- [14] 顾旭东. 碱化土壤紫花苜蓿根际土壤微环境及叶片氮代谢对氮磷添加响应机理的研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [15] 唐剑东. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林表层土壤养分的影响 [D]. 成都: 四川农业大学, 2017.
- [16] 许文静. 氮磷添加对不同盐生植物生态化学计量特征的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [17] 刘姝萱, 安 慧, 张馨文, 等. 氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响 [J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2724-2734.
- [18] 郑斯元, 王英遼, 刘鞠善, 等. 氮磷添加对羊草-土壤-根际微生物化学计量特征的影响 [J]. *东北师大学报 (自然科学版)*, 2022, 54(3): 146-156.
- [19] 黄晴晴. 氮添加对华北落叶松人工林植物生长和草本植物多样性的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2023.
- [20] LIU X, MA J, MA Z W, *et al.* Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. *Catena*, 2017, 50: 146-153.
- [21] TIAN D, YAN Z B, NIKLAS K J, *et al.* Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent[J]. *National Science Review*, 2018, 5(5): 728-739.
- [22] 张 丹, 邓 健, 朱 运, 等. 氮添加对黄土丘陵区草地土壤团聚体有机碳库的影响 [J]. 草地学报, 2023, 31(7): 2031-2040.
- [23] WU J P, LIU W F, ZHANG W X, *et al.* 2019. Long-term nitrogen addition changes soil microbial community and litter decomposition rate in a subtropical forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 43-51.
- [24] TIAN D S, NIU S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [25] NIU G X, LIU L, WANG Y L, *et al.* Effects of decadal nitrogen addition on carbon and nitrogen stocks in different organic matter fractions of typical steppe soils[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109471.
- [26] YUAN X B, NIU D C, GUO D, *et al.* Responses of soil carbon and nitrogen mineralization to nitrogen addition in a semiarid grassland: The role of season[J]. *Catena*, 2023, 220: 106719.
- [27] 王 昭. 氮沉降对鼎湖山常绿阔叶林土壤生态的影响 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2022, 53(3): 421-428.
- [28] 陈立新, 黄兰英, 乔 璐, 等. 模拟氮沉降对温带不同森林类型土壤氮矿化速率的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 139-146.
- [29] 陈 磊, 朱广宇, 刘玉林, 等. 黄土高原人工油松林土壤碳氮对短期氮添加的响应 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 346-352.
- [30] 李琛琛, 刘 宁, 郭晋平, 等. 氮沉降对华北落叶松叶特性和林下土壤特性的短期影响 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 1924-1932.
- [31] HALL J M, PATERSON E, KILLHAM K. The effect of elevated CO₂ concentration and soil pH on the relationship between plant growth and rhizosphere denitrification potential[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 209-216.
- [32] BOBBINK R, HICKS K, GALLOWAY J, *et al.* Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [33] REN H Y, KANG J, YUAN Z Y, *et al.* Responses of nutrient resorption to warming and nitrogen fertilization in contrasting wet and dry years in a desert grassland[J]. *Plant and Soil*, 2018, 432(1-2): 65-73.
- [34] SCHAAK K J, FUCHSLUEGER L, HOOSBEEK M R, *et al.* Litter inputs and phosphatase activity affect the temporal variability of organic phosphorus in a tropical forest soil in the Central Amazon[J]. *Plant Soil*, 2021, 469: 423-441.
- [35] LU M, YANG Y H, LUO Y Q, *et al.* Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a meta-analysis[J]. *New*

Phytol, 2011, 189(4): 1040-1050.

[36] DU E, TERRER C, PELLEGRINI A F A, *et al.* Global patterns of

terrestrial nitrogen and phosphorus limitation[J]. [Nature Geoscience](#), 2020, 13(3): 221-226.

Effects of Nitrogen Addition on Soil Nutrients in the Rhizosphere and non Rhizosphere of *Larix principis-rupprechtii* Plantation

LI Ru-zhen¹, LI Wen¹, YANG Liu¹, LU Jin-ping², MA Jiao-jiao², XU Zhong-qi¹, JIA Yan-long¹

(1. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China; 2. Mulanweichang National Forestry Administration of Hebei Province, Weichang 068450, Hebei, China)

Abstract: [Objective] Atmospheric nitrogen deposition has an important effect on forest rhizosphere and non-rhizosphere soil nutrients. North China is one of the regions with high nitrogen deposition in China. However, the threshold value of nitrogen deposition on forest soil nutrients in this region and whether it causes other nutrient limitations are still unclear. [Method] Based on *Larix principis-rupprechtii* plantation in a state-owned forest in Mulan Forestry, Hebei Province, China, the differential effects of nitrogen addition on rhizosphere and non-rhizosphere soils in terms of total nutrients, fast-acting nutrients and their ecological stoichiometry were analyzed through a multi-gradient nitrogen addition experiment. [Result] The results showed that: 1) The contents of organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) and available nitrogen (AN) in rhizosphere soil increased with the nitrogen addition level. The highest value was reached when the nitrogen addition was 80 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹, which increased by 39.55%, 36.27%, 56.69% and 44.02% compared with the control group. 2) In non-rhizosphere soil, NO₃⁻-N reached its maximum when nitrogen addition was 160 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹, which showed a significant difference from the control group. There were no significant differences in SOC, TN, TP contents under different nitrogen addition levels. 3) With the increase of nitrogen addition level, C : P and N : P in rhizosphere soil showed an increasing trend, while C : P and N : P in non-rhizosphere soil showed a decreasing trend. 4) Compared with the control group, the rhizosphere effects of SOC, TN, NO₃⁻-N, AN, AP, C : P, N : P showed an increasing trend after nitrogen addition. [Conclusion] This study shows that nitrogen addition can enhance the rhizosphere effect and increase the contents of SOC, TN, NO₃⁻-N and AN in rhizosphere soil of *Larix principis-rupprechtii* plantation and the threshold values are all at 80 kg N·ha⁻¹·yr⁻¹. In addition, nitrogen addition will change the soil phosphorus element balance, and the growth of *Larix principis-rupprechtii* plantation may face soil phosphorus restriction in the future. This study can provide theoretical and scientific basis for nutrient regulation of *Larix principis-rupprechtii* plantation under atmospheric nitrogen deposition or fertilization measures.

Keywords: nitrogen addition; soil nutrients; stoichiometry; rhizosphere effects; *Larix principis-rupprechtii* plantation

(责任编辑：崔 贝)