

DOI: 10.5846/stxb201907291593

纪娇娇, 张秋芳, 杨智杰, 熊德成, 刘小飞, 胥超. 模拟氮沉降对中亚热带杉木幼树根系生物量的影响. 生态学报, 2020, 40(17): 6118-6125.

Ji J J, Zhang Q F, Yang Z J, Xiong D C, Liu X F, Xu C. Effects of simulated nitrogen deposition on root biomass of subtropical Chinese fir saplings. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6118-6125.

模拟氮沉降对中亚热带杉木幼树根系生物量的影响

纪娇娇^{1,2}, 张秋芳^{1,2}, 杨智杰^{1,2}, 熊德成^{1,2,*}, 刘小飞^{1,2}, 胥超^{1,2}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要: 植物根系是全球陆地生态系统碳储量的重要组成部分, 在全球生态系统碳循环中起着重要作用, 日益加剧的氮沉降会影响根系生物量在空间和不同径级的分配, 进而影响森林生态系统的生产力和土壤养分循环。以杉木幼树为研究对象, 通过野外氮沉降模拟实验, 研究氮沉降四年后对不同土层、不同径级根系生物量的影响。结果发现: (1) 低氮和高氮处理总细根生物量较对照均无显著差异 ($P > 0.05$), 高氮处理粗根生物量及总根系生物量较对照分别增加 45% 和 40% ($P < 0.05$); (2) 与对照相比, 施氮处理显著增加 20—40 cm 与 40—60 cm 土层细根和粗根生物量, 且在低氮处理下, 20—40 cm 土层细根、粗根在总土层细根与粗根生物量的占比显著提高。(3) 与对照相比, 高氮处理显著增加了 2—5 mm、5—10 mm 及 10—20 mm 径级的根系生物量, 低氮处理显著增加 2—5 mm、5—10 mm 径级根系生物量, 且显著降低 20—50 mm 径级根系生物量。综上所述表明: 氮沉降后杉木幼树通过增加较粗径级根系来增加对养分及水分的输送, 同时通过增加深层根系生物量及其比例的策略来维持杉木幼树的快速生长; 而根系生物量的增加, 在一定程度上会增加根系碳源的输入, 影响土壤碳循环过程。

关键词: 氮沉降; 杉木; 根系生物量; 径级; 垂直分布

Effects of simulated nitrogen deposition on root biomass of subtropical Chinese fir saplings

Ji Jiaojiao^{1,2}, ZHANG Qiufang^{1,2}, YANG Zhijie^{1,2}, XIONG Decheng^{1,2,*}, LIU Xiaofei^{1,2}, XU Chao^{1,2}

1 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

Abstract: Plant roots are an important part of global terrestrial ecosystem carbon storage and play an important role in global ecosystem carbon cycle. Increasing nitrogen deposition will affect the allocation of root biomass in different soil layers and diameter classes, and further affect the productivity of forest ecosystem and soil nutrient cycle. In this study, the effects of four-year nitrogen deposition on the root biomass of Chinese fir saplings in different soil layers and different diameter classes were investigated. The results showed that: (1) Fine root biomass in the low nitrogen (LN) and the high nitrogen (HN) treatments did not differ from that of the control (CT) ($P > 0.05$). The coarse roots and total root biomass in HN treatment were 45% and 40% higher than that of CT, respectively ($P < 0.05$). (2) The biomass of fine roots and coarse roots in 20—40 cm and 40—60 cm soil layers increased significantly after nitrogen addition. In addition, the proportions of fine root biomass and coarse root biomass increased in the 20—40 cm soil layer in LN treatment; (3) Compared with the CT, HN treatment significantly increased root biomass of 2—5 mm, 5—10 mm and 10—20 mm diameter classes, LN treatment significantly increased root biomass (2—5 mm and 5—10 mm in diameter), but reduced root biomass (20—50 mm in diameter). Overall, after nitrogen deposition, Chinese fir saplings could increase the transport of nutrients and water

基金项目: 国家重大基础研究计划课题(2014CB954003)

收稿日期: 2019-07-29; 修订日期: 2020-06-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xdc104@163.com

by increasing roots with larger diameter, and maintain the rapid growth by increasing the biomass and proportion of roots in deeper soil layer. To a certain extent, the increase of root biomass will increase carbon input through roots and affect the process of soil carbon cycle.

Key Words: nitrogen deposition; Chinese fir; root biomass; diameter classes; vertical distribution

大气氮(N)沉降增加被认为是全球变化最重要的组成部分之一,威胁着陆地生态系统的结构和功能^[1-2]。有研究表明,我国南方和东部沿海地区已经成为全球三大氮沉降区之一,并朝着逐渐加重的趋势发展^[3]。植物根系是森林生态系统的重要组成部分,在陆地碳循环中起着至关重要的作用^[4],它不仅从土壤中吸收水分和养分用于植物生长,而且通过呼吸和周转消耗光合产物。根系生物量占植物总生物量的16%—63%,在吸收养分资源、固定地上部分发挥着重要作用^[5-6]。日益加剧的氮沉降会影响根系生物量在土壤空间和不同径级的分配,进而影响森林生态系统的生产力和土壤养分循环^[7-9]。

根系生物量及其分布情况决定了植物获取资源的能力,体现植物对环境的适应与竞争力^[10]。然而,当前有关氮沉降对根系生物量影响的研究结论并不一致,有研究发现根系生物量随氮沉降浓度的升高而显著增加^[11],而也有研究表明根系生物量对氮沉降呈现负响应^[12]。同时,不同径级根系在养分吸收和植物生长中承担不同的作用,对氮沉降的响应也存在差异^[13]。通常定义根系直径 ≤ 2 mm为细根,能够吸收养分和水分供应根系自身和树冠生长^[14],大气氮沉降往往会提高土壤氮的有效性,促进细根对养分的吸收效率而减少细根的生长^[15-16]。直径 > 2 mm的为粗根,负责储存和运输营养物质并依靠对土壤的吸附力支撑树木生长^[17],与细根相比,粗根的木质化水平更高且生物量对氮添加的响应并不显著^[18]。当前,由于受到取样条件的限制有关粗根的研究较少,因此也影响了对森林生态系统的生产力和土壤养分循环的估算。此外,植物还会在生长过程中通过调整根系的分布来适应环境变化,如有研究发现施氮四年显著降低了0—10 cm土层细根生物量,而深层受氮沉降影响较小^[19]。当前多数研究通过模型等方式对不同土层根系生物量进行估算,仍然无法具体、精准的反应地下根系生长情况,这也限制了对根系垂直分布的深入了解与探讨^[20]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国亚热带特有的优良速生针叶用材树种,人工种植面积达1239.1万 hm^2 ,约占我国人工林面积的25%,在我国森林蓄积量和木材生产中占有重要的地位^[21]。为此,本研究通过野外模拟大气氮沉降实验,研究在未来氮沉降加剧情况下如何影响杉木不同径级根系生物量生长特征及根系生物量的垂直分布模式,以期为进一步探讨全球变化对杉木人工林生长与地下生产力的影响提供基础数据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究试验样地设置在福建省三明森林生态系统与全球变化定位观测研究站(26°19'N, 117°36'E),该区东南接戴云山,西北连武夷山脉,主要地形为低山丘陵,平均海拔330 m。属于我国亚热带季风气候区,年均温约为19.1℃,降水多集中在3—8月份,年平均降水量为1750 mm。研究区土壤以黑云母花岗岩发育的红壤为主。

1.2 样地设置

根据本研究区大气氮沉降背景值(36.3 $\text{kg N hm}^{-2} \text{a}^{-1}$),共设置3个处理:分别记为对照(CT, 0 $\text{kg N hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)、低氮处理(LN, 40 $\text{kg N hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)和高氮处理(HN, 80 $\text{kg N hm}^{-2} \text{a}^{-1}$),每种处理5个重复。实验小区于2013年开始建立,每个小区面积为2 m \times 2 m,小区四周采用4块焊接的PVC板(200 cm \times 70 cm深)将小区与周围土壤隔开。2013年11月,在每个小区均匀种植4棵一年生杉木幼苗,平均高度为25.7 \pm 2.5 cm,平均主干基径为3.4 \pm 0.4 mm。2014年3月开始对实验小区进行模拟氮沉降实验,实验过程持续4年,至2018年3月截止。每月月初将所需的分析纯 NH_4NO_3 溶解在800 mL(相当于年降雨量增加约2 mm)去离子水中并使用

手提式喷洒器对杉木幼苗进行均匀喷洒,对照小区喷洒等量的去离子水。

1.3 杉木生长及根系生物量测定

生长测定:于 2018 年 4 月开始对试验小区的杉木进行收获,并对各个处理小区中杉木生长指标进行调查。主要采用围径尺对幼树 1.3 m 处的胸径进行测定,利用皮尺对树高进行测定。

根系生物量测定:在地上部分收获结束后采用全挖法按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 三个土层对根系进行全收获,将所有根系按照土层分别带回实验室进行清洗,并使用游标卡尺按照 0—2 mm、2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm、20—50 mm 对根系进行分级处理,将直径 ≤ 2 mm 的根系划分为细根,将直径 > 2 mm 的根系划分为粗根。然后分别放置在 65℃ 烘箱烘至恒重并称重登记,最后进一步计算出不同径级、不同土层单位面积根系生物量,计算公式如下(1):

$$\text{根系生物量} = \text{根系干重 (g)} / 4 \text{ (m}^2\text{)} \quad (1)$$

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 对数据进行处理,用 SPSS 20.0 进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行差异显著性分析,并通过最小显著差异法(LSD)比较不同处理各土层、各径级根系生物量差异以及各处理不同土层及不同径级根系生物量差异($\alpha = 0.05$);通过双因素方差分析分析氮沉降与土层、氮沉降与径级对根系生物量的影响。使用 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对杉木树高及胸径的影响

经过四年氮沉降实验后发现,与对照相比,高氮处理显著促进杉木树高和胸径的生长($P < 0.05$),树高和胸径分别较对照增加 20% 和 19%,而低氮处理树高和胸径较对照均无显著差异($P > 0.05$);同时高氮处理较低氮处理树高和胸径均显著增加($P < 0.05$)(图 1)。

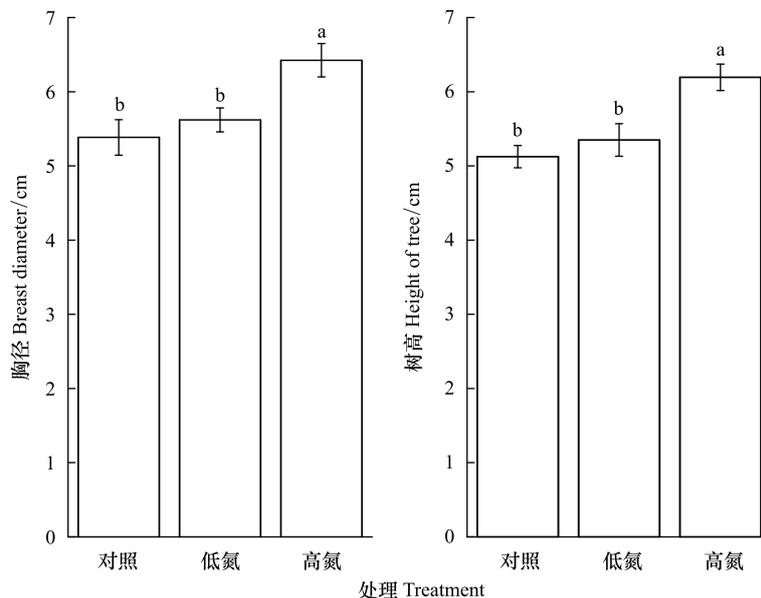


图 1 不同处理下杉木胸径及树高

Fig.1 The height and breast diameter of *Cunninghamia lanceolata* for the different treatments

图中 CT、LN 和 HN 3 种处理分别表示对照、低氮和高氮。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), (Mean \pm SE), $n = 5$

2.2 氮沉降对总根系生物量的影响

施氮处理下杉木总细根生物量较对照均无显著差异($P > 0.05$)(图 2)。低氮处理后总根系生物量较对

照增加 21%,但未达到显著水平 ($P > 0.05$),而高氮处理粗根生物量及总根系生物量较对照分别显著增加 45%和 40% ($P < 0.05$) (图 2)。

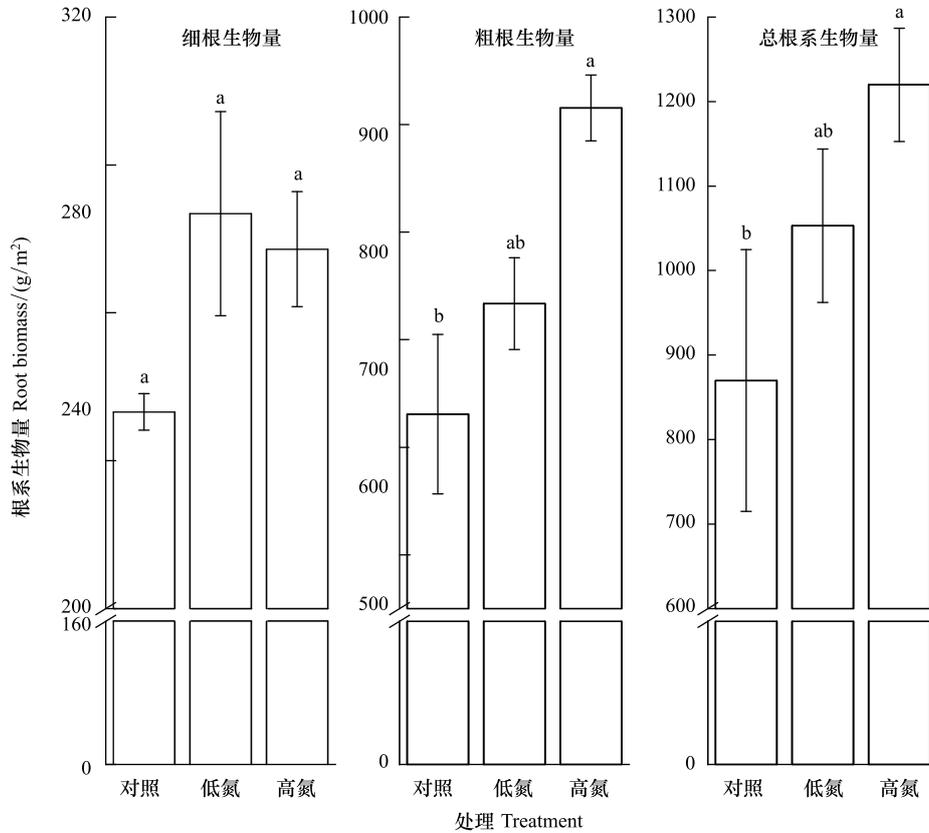


图 2 不同处理对根系生物量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on root biomass

图中 CT、LN 和 HN 3 种处理分别表示对照、低氮和高氮;不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), (Mean±SE), $n = 5$

2.3 氮沉降对不同土层根系生物量的影响

低氮处理后 20—40 cm 和 40—60 cm 土层细根及粗根生物量较对照均显著增加 ($P < 0.05$),高氮处理后 20—40 cm 和 40—60 cm 土层粗根生物量较对照显著增加 ($P < 0.05$) (图 3)。施氮处理对细根生物量无显著影响 ($P > 0.05$),对粗根生物量及总根系生物量均有显著影响 ($P < 0.05$),低氮处理后 20—40 cm 与 40—60 cm 土层总根系生物量较对照分别增加 56%和 74% ($P < 0.05$),高氮处理后各土层总根系生物量较对照分别增加 35%、60%和 39% ($P < 0.05$) (图 3)。双因素方差分析表明:土层对细根生物量、粗根生物量及总根系生物量均具有极显著影响 ($P < 0.01$),而氮沉降与土层的交互作用对其均无显著影响 ($P > 0.05$) (表 1)。

表 1 氮沉降、土层及其交互作用对根系生物量的影响

Table 1 The effects of nitrogen deposition, soil layer and their interaction on root biomass

P 变异来源 Source of variation	细根生物量 Fine root biomass	粗根生物量 Coarse root biomass	细根+粗根生物量 Total root biomass
氮沉降 Nitrogen deposition	0.085	0.004	0.017
土层 Soil layer	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
氮沉降×土层 Nitrogen deposition×Soil layer	0.933	0.492	0.789

低氮处理后 20—40 cm 土层细根生物量占总土层细根生物量的比例较对照显著增加 ($P < 0.05$),高氮处理各土层细根生物量占总土层细根生物量比例较对照均无显著差异 ($P > 0.05$) (图 4)。低氮处理后表层粗

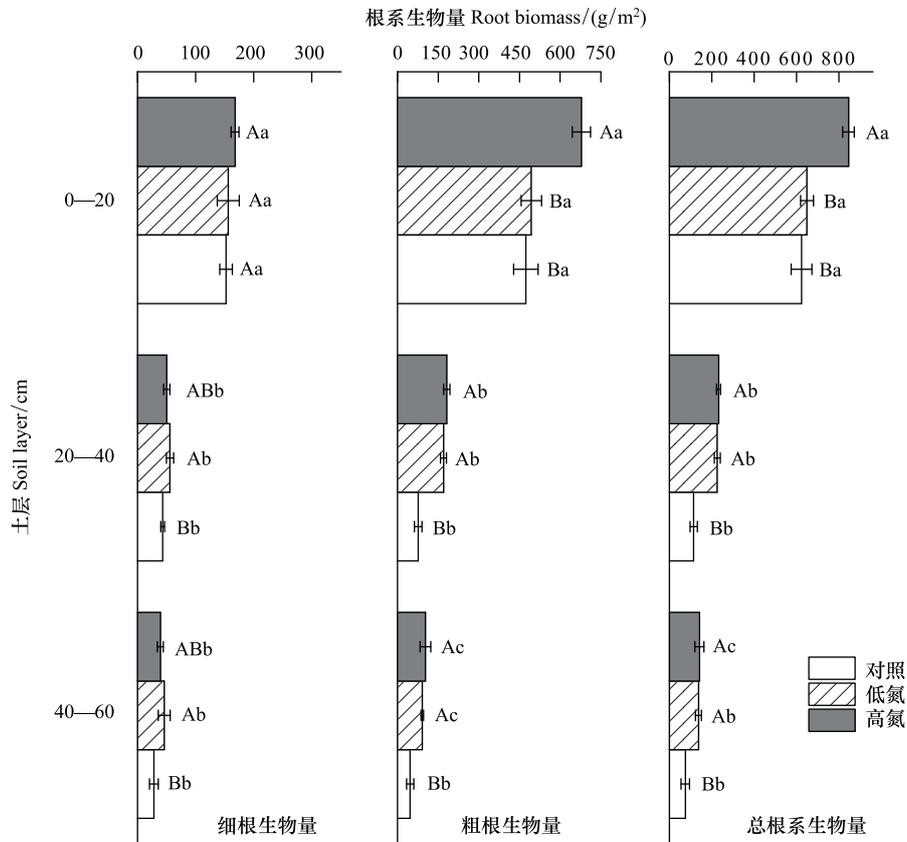


图3 不同处理对不同土层根系生物量的影响

Fig.3 Effect of difereene treatment on root biomass in different soil layers

图中 CT、LN 和 HN 3 种处理分别表示对照、低氮和高氮；不同大写字母表示同土层不同处理差异显著，不同小写字母表示同处理不同土层差异显著 ($P < 0.05$)，(Mean±SE)， $n = 5$

根生物量占总土层粗根生物量比例较对照显著降低 ($P < 0.05$)，而 20—40 cm 及 40—60 cm 土层粗根生物量占总土层粗根生物量比例均显著增加 ($P < 0.05$)；高氮处理则仅表现为 20—40 cm 土层粗根生物量占总土层粗根生物量比例较对照显著增加 ($P < 0.05$) (图 4)。

2.4 氮沉降对不同径级根系生物量的影响

低氮处理显著增加 2—5 mm 和 5—10 mm 根系生物量，与对照相比，分别增加 71% 和 44% ($P < 0.05$)，同时显著降低 20—50 mm 根系生物量 (30%) ($P < 0.05$)；高氮处理显著增加了 2—5 mm、5—10 mm 以及 10—20 mm 径级的根系生物量，分别较对照增加 89%、64% 和 58% ($P < 0.05$)，而 20—50 mm 根系生物量较对照并无显著差异 ($P > 0.05$) (图 5)。同时，除 0—2mm 径级根系外，高氮处理各径级根系生物量较低氮处理均显著增加 ($P < 0.05$) (图 5)。双因素方差分析表明：氮沉降、径级及两者的交互作用对根系生物量均有极显著影响 ($P < 0.01$) (表 2)。

表 2 氮沉降、径级及其交互作用对根系生物量的影响

Table 2 The effects of nitrogen deposition, diameter class and their interaction on root biomass

P 变异来源 Source of variation	根系生物量 Root biomass
氮沉降 Nitrogen deposition	<0.0001
径级 Diameter class	<0.0001
氮沉降×径级 Nitrogen deposition×Diameter class	<0.0001

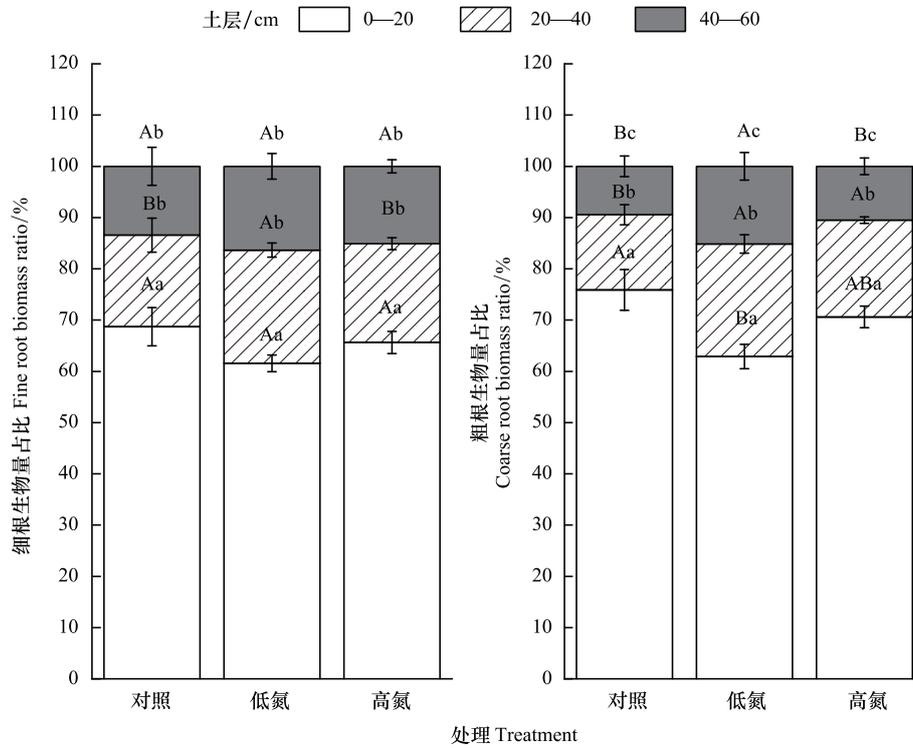


图 4 不同土层细根与粗根生物量占总土层细根及粗根生物量比例

Fig.4 The proportion of fine root and coarse root biomass to total fine root and coarse root biomass in different soil layers

图中 CT、LN 和 HN 3 种处理分别表示对照、低氮和高氮;不同大写字母表示同土层不同处理差异显著,不同小写字母表示同处理不同土层差异显著($P < 0.05$), (Mean±SE), $n = 5$

3 讨论

3.1 氮沉降对总根系生物量的影响

氮素对植物根系的生长有至关重要的作用,若氮素缺乏则会影响植物根系发育,而氮含量过多则会导致导致土壤酸化、碱性阳离子和硝酸盐流失,间接影响根系的养分吸收和生长^[22]。由于不同研究区氮含量、施氮量、树种等存在差异,当前关于氮沉降对根系生物量的影响争议较大^[23-25]。本研究表明,高氮处理后总根系生物量显著增加,这主要是由于高氮沉降处理促进了杉木幼树树高和胸径的生长,植物需要增加地下部分生物量以支撑地上部分的增长。张蕾等^[26]研究发现根系生物量与施氮浓度呈正相关,与本研究结果一致。Wang 等^[27]两年的施氮实验表明不同程度的施氮处理均未显著增加总根系生物量,这可能是由于不同树种的生长特性以及施氮时长差异造成。本研究还发现,杉木根系生物量随着施氮浓度的增加而增加,这与许多野外实验研究^[28-29]及 meta 分析研究^[30]结果类似。

3.2 氮沉降对不同土层根系生物量的影响

有研究表明,根系生物量垂直分布主要受土壤养分、土壤含水量与温度等因素的影响^[31]。本研究中,施

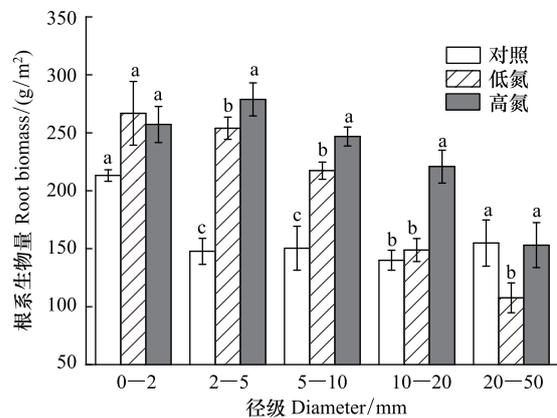


图 5 不同径级根系生物量

Fig.5 Root biomass of different diameter classes

图中 CT、LN 和 HN 3 种处理分别表示对照、低氮和高氮;不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), (Mean±SE), $n = 5$

氮处理没有改变0—20 cm 土层细根生物量,而 Wang 等^[32]研究则发现细根生物量降低,这可能由于在降雨量较低的寒温带地区施氮加剧了植物根系的水分胁迫,造成表层土壤根系生物量下降^[15]。本研究还发现,低氮处理显著增加20—40 cm 土层细根生物量以及在总土层细根生物量的占比,这可能是由于低氮处理对杉木生长有促进作用,为维持生长杉木细根需向深层分布获取充足的养分。相关研究也得出类似的结论^[19,33],而无论是低氮处理还是高氮处理都显著增加20—40 cm 土层粗根生物量以及在总土层粗根生物量的占比,同时,氮沉降显著增加40—60 cm 土层细根与粗根生物量,这可能主要在于氮沉降后,植物加速生长,需要将更多生物量分配至深层土壤,向地下不断扩展生长空间,并依靠深层土壤细根获取更多水分及养分以供植物生长所需^[34]。同时,由于施氮促进地上部分快速生长,植物需要将更多粗根生物量分配至深层土壤,以起到对地上部分的固定与支撑作用。同时双因素方差分析结果发现氮沉降对粗根生物量及总根系生物量均有显著影响($P < 0.05$);土层对细根生物量、粗根生物量及总根系生物量均具有极显著影响($P < 0.01$),表明氮沉降和土层均对粗根生物量及总根系生物量具有重要的影响。综上所述,施氮四年后,杉木幼树通过改变根系垂直分布(增加深层根系生物量及比例)来维持其生长。

3.3 氮沉降对不同径级根系生物量的影响

不同径级根系在植物生长过程中的功能不同,且在自身分解上也存在差异,因此造成生物量累积的差异^[35]。本研究发现,氮沉降没有显著改变0—2 mm 根系生物量,与陈冠陶等^[35]的研究结果一致。这可能主要与氮沉降后细根周转速率加快有关。本研究前期研究就发现施氮处理显著提高了细根的周转速率^[36]。本研究还发现低氮及高氮处理均显著增加2—5 mm 和5—10 mm 根系生物量,同时高氮处理后10—20 mm 根系生物量也显著增加。这可能主要在于施氮促进杉木生长,对土壤水分及养分的需求增加,促进根系对养分的吸收,加快水分及养分的运输,因此杉木需分配更多的生物量到较粗径级的根系,保证水分及养分的快速运输^[37]。而由于高氮处理对杉木生长促进作用更为显著,对水分及养分需求较氮处理更大,因此通过增加2—5 mm、5—10 mm、10—20 mm 根系生物量保证更多水分和养分的运移。Meta 分析^[30]也表明氮沉降使粗根根系生物量显著增加56.5%,与本研究结果一致。另外低氮处理显著降低了20—50 mm 根系生物量,而高氮处理20—50 mm 根系生物量并无显著变化。这可能主要在于低氮处理后对杉木生长具有促进作用,更多的通过增加中等径级的根系生物量来维持生长,而最高径级根系生物量分配相对较低。同时,双因素方差分析发现氮沉降、径级及两者的交互作用对根系生物量均有极显著影响,表明在分析氮沉降对根系生物量的影响时还应充分考虑径级的因素以及氮沉降和径级的交互作用对根系生物量的影响。

4 结论

氮沉降处理后杉木幼树细根生物量较对照均无显著变化,而粗根(2—5mm、5—10 mm 和10—20 mm)和总根系生物量显著增加,较粗径级根系生物量的增加能够促进根系与地上部分养分的运输与转移,维持地上与地下的协同增长。此外,氮沉降促进了深层土壤根系生物量的增加。本研究区短期氮沉降随着氮水平的增加对杉木生长的促进作用增加,高氮处理较低氮处理地上生长、地下根系生物量均显著增加,这也表明杉木在亚热带地区的生长过程中仍有可能处于氮限制状态。综上所述,氮沉降条件下杉木幼树通过增加较粗径级根系生物量及增加深层根系生物量分布来维持生长。

参考文献 (References):

- [1] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman J W, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, De Vries W. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 30-59.
- [2] Phoenix G K, Emmett B A, Britton A J, Caporn S J M, Dise N B, Helliwell R, Jones L, Leake J R, Leith I D, Sheppard L J, Sowerby A, Pilkington M G, Rowe E C, Ashmore M R, Power S A. Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1197-1215.
- [3] Liu X J, Duan L, Mo J M, Du E Z, Shen J L, Lu X K, Zhang Y, Zhou X B, He C E, Zhang F S. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview. *Environmental Pollution*, 2011, 159(10): 2251-2264.

- [4] Smithwick E A H, Eissenstat D M, Lovett G M, Bowden R D, Rustad L E, Driscoll C T. Root stress and nitrogen deposition: consequences and research priorities. *New Phytologist*, 2013, 197(3): 712-719.
- [5] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(12): 692-699.
- [6] Erktan A, McCormack M L, Roumet C. Frontiers in root ecology: recent advances and future challenges. *Plant and Soil*, 2018, 424(1/2): 1-9.
- [7] Rasse D P. Nitrogen deposition and atmospheric CO₂ interactions on fine root dynamics in temperate forests: a theoretical model analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(5): 486-503.
- [8] Hyvönen R, Persson T, Andersson S, Olsson B, Ågren G I, Linder S. Impact of long-term nitrogen addition on carbon stocks in trees and soils in northern Europe. *Biogeochemistry*, 2008, 89(1): 121-137.
- [9] Pregitzer K S, Burton A J, Zak D R, Talhelm A F. Simulated chronic nitrogen deposition increases carbon storage in northern Temperate forests. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 142-153.
- [10] 杜明新, 周向睿, 周志宇, 卢鑫, 梁坤伦, 周媛媛, 陶晓慧. 毛乌素沙南缘紫穗槐根系垂直分布特征. *草业学报*, 2014, 23(2): 125-132.
- [11] 张蕊, 王艺, 金国庆, 周志春, 丰忠平. 施氮对木荷 3 个种源幼苗根系发育和氮磷效率的影响. *生态学报*, 2013, 33(12): 3611-3621.
- [12] Son Y, Hwang J H. Fine root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantation in central Korea. *Ecological Research*, 2003, 18(3): 339-346.
- [13] Lei P F, Scherer-Lorenzen M, Bauhus J. Belowground facilitation and competition in young tree species mixtures. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265: 191-200.
- [14] Song X Z, Li Q, Gu H H. Effect of nitrogen deposition and management practices on fine root decomposition in Moso bamboo plantations. *Plant and Soil*, 2017, 410(1/2): 207-215.
- [15] de Vries W, Du E Z, Butterbach-Bahl K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 9-10: 90-104.
- [16] 刘金梁, 梅莉, 谷加存, 全先奎, 王政权. 内生长法研究施氮肥对水曲柳和落叶松细根生物量和形态的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 1-6.
- [17] Bengough A G, McKenzie B M, Hallett P D, Valentine T A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(1): 59-68.
- [18] Wang G L, Liu F. Carbon allocation of Chinese pine seedlings along a nitrogen addition gradient. *Forest Ecology and Management*, 2014, 334: 114-121.
- [19] 徐钰, 许凯, 于水强, 阮宏华, 范换, 杨悦, 徐长柏, 曹国华. 不同林龄杨树细根生物量分配及其对氮沉降的响应. *生态学杂志*, 2014, 33(3): 583-591.
- [20] Lin C, Coops N C, Hermosilla T, Innes J, Dai J S, She G H. Using small-footprint discrete and full-waveform airborne LiDAR metrics to estimate total biomass and biomass components in subtropical forests. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 7110-7135.
- [21] Chen F S, Niklas K J, Yu L, Fang X M, Wan S Z, Wang H M. Nitrogen and phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age. *Tree Physiology*, 2015, 35(10): 1106-1117.
- [22] Höegberg P, Fan H B, Quist M, Binkley D, Tamm C O. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest. *Global Change Biology*, 2006, 12(3): 489-499.
- [23] Jia S X, Wang Z Q, Li X P, Sun Y, Zhang X P, Liang A Z. N fertilization affects on soil respiration, microbial biomass and root respiration in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* plantations in China. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2): 325-336.
- [24] Zhou Y M, Tang J W, Melillo J M, Butler S, Mohan J E. Root standing crop and chemistry after six years of soil warming in a temperate forest. *Tree Physiology*, 2011, 31(7): 707-717.
- [25] 宋平, 张蕊, 张一, 周志春, 丰忠平. 模拟氮沉降对低磷胁迫下马尾松无性系细根形态和氮磷效率的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(11): 1136-1144.
- [26] 张蔷, 李家湘, 谢宗强. 氮添加对亚热带山地杜鹃灌丛土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2017, 41(1): 95-104.
- [27] Wang G L, Liu F, Xue S. Nitrogen addition enhanced water uptake by affecting fine root morphology and coarse root anatomy of Chinese pine seedlings. *Plant and Soil*, 2017, 418(1/2): 177-189.
- [28] 李化山, 汪金松, 法蕾, 赵秀海. 模拟氮沉降对油松幼苗生长的影响. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(5): 774-780.
- [29] 张娜. 氮沉降对不同种源地五角枫幼苗生长的影响. *山西林业科技*, 2017, 46(1): 23-24, 27-27.
- [30] Li W B, Jin C J, Guan D X, Wang Q K, Wang A Z, Yuan F H, Wu J B. The effects of simulated nitrogen deposition on plant root traits: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 82: 112-118.
- [31] 蔡瑛莹, 熊德成, 李茵茵, 郑欣, 陈廷廷, 陈望远, 郭润泉, 宋涛涛, 陈光水, 杨玉盛. 土壤增温和氮沉降对杉木幼树细根生物量的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(1): 36-44.
- [32] Wang C G, Han S J, Zhou Y M, Yan C F, Cheng X B, Zheng X B, Li M H. Responses of fine roots and soil N availability to short-term nitrogen fertilization in a broad-leaved Korean pine mixed forest in northeastern China. *PLoS One*, 2012, 7(3): e31042.
- [33] Yan G Y, Chen F, Zhang X, Wang J Y, Han S J, Xing Y J, Wang Q G. Spatial and temporal effects of nitrogen addition on root morphology and growth in a boreal forest. *Geoderma*, 2017, 303: 178-187.
- [34] 李继伟, 左海涛, 李青丰, 范希峰, 侯新村. 柳枝稷根系垂直分布及植株生长对土壤盐分类型的响应. *草地学报*, 2011, 19(4): 644-651.
- [35] 陈冠陶, 彭勇, 郑军, 李顺, 彭天驰, 邱细容, 涂利华. 氮添加对亚热带次生常绿阔叶林扁刺栲细根生物量、寿命和形态的短期影响. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1041-1050.
- [36] Xiong D C, Yang Z J, Chen G H, Liu X F, Lin W S, Huang J X, Bowles F P, Lin C F, Xie J S, Li Y Q, Yang Y S. Interactive effects of warming and nitrogen addition on fine root dynamics of a young subtropical plantation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 180-189.
- [37] Wang W, Guo J X, Oikawa T. Contribution of root to soil respiration and carbon balance in disturbed and undisturbed grassland communities, Northeast China. *Journal of Biosciences*, 2007, 32(2): 375-384.