

DOI: 10.5846/stxb201709191684

郭润泉,熊德成,宋涛涛,蔡瑛莹,陈廷廷,陈望远,郑欣,陈光水.模拟氮沉降对杉木幼苗细根化学计量学特征的影响.生态学报,2018,38(17):

Guo R Q, Xiong D C, Song T T, Cai Y Y, Chen T T, Chen W Y, Zheng X, Chen G S. Effects of simulated nitrogen deposition on stoichiometry of fine roots of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17):

模拟氮沉降对杉木幼苗细根化学计量学特征的影响

郭润泉^{1,2}, 熊德成^{1,2}, 宋涛涛^{1,2}, 蔡瑛莹^{1,2}, 陈廷廷^{1,2}, 陈望远^{1,2}, 郑欣¹, 陈光水^{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:为了揭示全球氮(N)沉降对杉木人工林细根碳(C)、氮(N)、磷(P)元素组成的影响,在福建三明陈大有林场开展杉木(*Cunninghamia lanceolata*)幼苗模拟N沉降试验,设置了对照(CK)、低N(LN, 40 kg N hm⁻² a⁻¹)、高N(HN, 80 kg N hm⁻² a⁻¹)3个处理,每个处理5个重复。采用内生长环法通过2年4次取样探讨N沉降对细根C、N、P化学计量学的影响。结果显示:(1)N添加在2015年降低细根C浓度,此后低N处理无影响,高N添加在2016年增加了细根C浓度;高N添加提高了细根(特别是0—1 mm细根)N浓度,但低N添加则无显著影响,甚至在2016年7月显著降低细根N浓度;N添加在2015年对细根P浓度无显著影响,但在2016年导致细根(特别是0—1 mm细根)P浓度降低。(2)低N添加在2016年显著提高细根的C:N比,而高N添加则在2015年1月显著降低细根的C:N比;低N添加对细根N:P比没有显著影响,而高N添加则在大部分取样时间里显著增加了细根N:P比。(3)不同处理细根C浓度、C:N比均随着时间的增加呈增加趋势,而细根N浓度和N:P比呈降低趋势。本研究表明,N添加对杉木细根化学计量学特征的影响因不同N添加水平而异,并受苗木生长的稀释效应所调节。

关键词:氮沉降;细根;碳、氮、磷;碳氮比;氮磷比

Effects of simulated nitrogen deposition on stoichiometry of fine roots of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings

GUO Runquan^{1,2}, XIONG Decheng^{1,2}, SONG Taotao^{1,2}, CAI Yingying^{1,2}, CHEN Tingting^{1,2}, CHEN Wangyuan^{1,2}, ZHENG Xin¹, CHEN Guangshui^{1,2,*}

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

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

Abstract: Atmospheric nitrogen deposition is thought to have profound effects on terrestrial ecosystems. There have been many studies on the effects of nitrogen deposition on the aboveground parts of plants in the past few decades. However, the effects of nitrogen deposition on the belowground parts of plants are unclear. A simulated nitrogen deposition experiment was conducted to investigate the impact of nitrogen deposition on fine root stoichiometry of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) seedlings in Chenda State-owned Forestry Farm, Sanming, Fujian Province. Including ambient nitrogen deposition, three nitrogen addition levels were set: control (CK, ambient + 0 kg N hm⁻² a⁻¹), low nitrogen (LN, ambient + 40 kg N hm⁻² a⁻¹), and high nitrogen (HN, ambient + 80 kg N hm⁻² a⁻¹), with 5 replicates per treatment. The ingrowth donut method was applied to measure the stoichiometry of fine roots, including concentrations of C, N, and P, and the C:N

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(31422012);973前期专项课题(2014CB460602);福建省杰出青年基金项目滚动资助项目(2014J07005)

收稿日期:2017-09-19; 网络出版日期:2018-00-00

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

and N:P ratios. The results showed that: (1) Nitrogen addition decreased the fine root C concentration in 2015; after that, LN treatment had no effect, but HN treatment increased the fine root C concentration. HN treatment increased the fine root (especially 0—1 mm root) N concentration, but LN treatment had no significant effect or significantly decreased fine root N concentration in July 2016. Nitrogen addition had no significant effect on fine root P concentration in 2015, but resulted in a decrease of fine root (especially 0—1 mm root) P concentration in 2016. (2) HN treatment significantly reduced the C:N ratio of fine roots in January 2015 and January 2016, while LN treatment significantly increased the C:N ratio of fine roots in July 2016. LN treatment had no significant effect on fine root N:P ratio, whereas HN treatment significantly increased fine root N:P ratio at most sampling times. (3) The C concentration and the C:N ratio of fine roots showed an increasing trend, but the concentration of fine root N and the N:P ratio showed a decreasing trend with time. This study showed that the effects of nitrogen addition on the stoichiometry of fine roots varied with different nitrogen addition levels and were regulated by the dilution effect of seedling growth.

Key Words: nitrogen deposition; fine root; carbon, nitrogen, phosphorus; carbon: nitrogen ratio; nitrogen: phosphorus ratio

近百年来,由于大量含氮(N)化肥的生产和使用、矿物燃料燃烧和农牧业的快速发展,人类活动向大气中排放的含N化合物日益增多^[1],上个世纪大气N沉降增加了3—5倍^[2],预计到本世纪末全球N沉降速率还将增加2.5倍^[3],这些含N化合物通过干湿沉降进入陆地生态系统并对其产生巨大影响^[4]。在这一全球变化背景下,N沉降研究已成为国际上生态和环境研究的热点内容之一^[5]。

植物根系是碳(C)及其它矿物质元素在陆地生态系统的重要储存库^[6],是全球陆地生态系统C循环和养分循环的重要组成部分^[7],细根作为植物吸收养分和水分的重要器官^[8],是根系中最活跃和最敏感的部分^[9],对气候变化更敏感,细根动态在生态系统C和养分循环中起着重要作用^[10]。

C、N和磷(P)作为植物生长发育所必需的元素^[11],对植物生长和各种生理机能的调节起着非常重要的作用^[12];且C、N和P等主要元素之间的化学计量比是影响生态系统中植物生长的主要因素^[13]。细根组织C、N、P浓度对N沉降的动态响应将显著影响森林生态系统的生产力和C源汇变化。系统研究不同径级根系养分特征,对认识植物对养分资源的分配和利用,了解森林生态系统C和养分循环具有重要的意义^[14]。有研究表明,N是大多数北方森林、温带和部分热带生态系统中C和养分循环动态的限制性资源^[15],模拟N沉降增加了植物根系的硝酸盐可用性,导致细根吸收和存储的N增加^[16],在N沉降强度较高的样地,细根中N浓度和酸溶性有机质含量增加^[15]。Krasowski等发现,N添加后白云杉(*Picea glauca*)细根直径增加、木质部直径增粗,细根C浓度升高^[8]。Li等通过Meta分析发现模拟N沉降降低了细根C浓度,显著增加了细根N浓度,细根C:N比降低^[17],细根分解速率降低^[18],增加土壤C存储^[17,19];王延平通过对杨树不同季节细根CN浓度变化研究发现,细根C浓度呈现出生长季较高,非生长季降低的特点,细根N浓度呈相反趋势^[20]。

植物在生长过程中对N、P元素需求量很大,因此,N和P通常是生态系统初级生产力的限制性因素^[21]。N沉降水平的提高改变了养分有效性,可能使生态系统从N限制转变为P限制或N和P共同限制^[22],樊后保通过对一年生杉木幼苗不同梯度的N添加研究发现,N添加显著增加了细根N浓度,对细根P浓度影响不显著,细根N:P比增加。低水平的施N增加了苗木单株生物量,增加N贮存,但过量的N输入抑制了苗木的生长和生物量的积累,导致N与其他元素的比值失衡,影响苗木的正常生长^[23]。目前,有关N沉降对细根元素化学计量学的影响主要集中在对细根C、N的影响上,而对细根P浓度的影响较少^[24];而且大部分研究是短期的影响,而N沉降对细根元素化学计量学的长期动态影响研究很少,特别是林木生长本身在调节细根化学计量学特征对N沉降响应上的作用仍不清楚。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国南方重要的造林和用材树种,种植广泛,面积达 $1239.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$,蓄积量为 $47357.33 \times 10^4 \text{ m}^3$,分别占全国人工林面积和蓄积量的26.55%和46.89%,在中国人工林中占据重要地

位^[25]。目前,N 沉降对杉木地下特别是细根的影响还鲜有报道^[24]。为此,本研究通过在亚热带地区模拟 N 沉降试验,研究 N 沉降对杉木幼苗细根 C、N、P 化学计量学两年的动态影响,以期为进一步揭示 N 沉降对杉木人工林生产力和 C 吸存的影响提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建三明森林生态系统与全球变化研究站陈大观测点(26°19' N, 117°36' E)。该区域为中亚热带季风气候,多年平均气温 19.1℃,年均降雨量 1749 mm 且多集中在每年 3—8 月,年均蒸发量 1585 mm,相对湿度 81%。土壤以黑云母花岗岩发育的红壤和黄壤为主,平均海拔 300 m。

1.2 实验设计

根据本试验区 N 沉降水平的背景值为 36 kg N hm⁻² a⁻¹^[26],本试验设置了 3 个处理:(1)未施 N 的对照(CK)、(2)低 N 添加(LN, 40 kg N hm⁻² a⁻¹)、(3)高 N 添加(HN, 80 kg N hm⁻² a⁻¹),每个处理 5 个重复,共 15 个实验小区。小区面积 2 m×2 m,小区土壤取自附近杉木林,取土时按 0—10、10—20、20—70 cm 分层去除杂物后充分搅拌均匀,以消除土壤异质性,然后分层填至各小区,并调整土壤容重,与取土杉木林基本相同。小区四周采用 4 块 PVC 板(200 cm×70 cm)焊接而成,与周围土壤隔开,防止小区之间相互干扰。2013 年 11 月在每个小区种植 4 棵 1 年生杉木幼苗。并于 2014 年 3 月份开始施 N 肥(NH₄NO₃,分析纯),每月月初以溶液的形式对小区喷洒,全年共 12 次。按照处理水平要求,将每个小区每次所需要喷洒的 NH₄NO₃溶解在 800 mL (相当年降雨量增加约 2 mm)去离子水中,用手提式喷雾器在小区四周从幼苗林冠上方对小区均匀喷洒。对照小区喷洒等量的去离子水,全年共 12 次。

1.3 土壤样品的采集和分析

2015 年 1 月,采用土钻法在每个小区随机取 4 个土样,土钻直径 3.5 cm,测定 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤的基本理化性质(表 1)。

表 1 氮沉降试验小区土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in CK, LN and HN plots (means ± SD)

土壤性质 Soil property	土层 Soil layer/cm	样地 Plot		
		对照 CK Control	低氮 LN Low nitrogen	高氮 HN High nitrogen
可溶性有机碳 DOC/(mg/kg)	0—10	6.71±1.55a	6.00±0.93ab	4.82±0.68b
Dissolved organic carbon	10—20	5.30±0.55a	5.96±0.96a	5.69±1.22a
可溶性有机氮 DON/(mg/kg)	0—10	3.82±0.80c	7.66±2.25b	17.10±5.38a
Dissolved organic nitrogen	10—20	4.49±0.65b	6.50±2.80b	16.19±2.48a
铵态氮/(mg/kg)	0—10	3.65±1.05b	4.33±0.91b	14.00±2.34a
Ammonium nitrogen	10—20	3.10±0.55b	3.52±0.37b	12.23±4.89a
硝态氮/(mg/kg)	0—10	3.28±1.43c	9.98±0.68b	19.08±4.10a
Nitrate nitrogen	10—20	2.70±0.98b	4.25±2.30b	17.37±2.80a
全磷 TP/(mg/kg)	0—10	211.33±12.93a	203.24±15.52a	221.08±12.33a
Total phosphorus	10—20	217.29±16.6a	207.54±10.81a	201.89±4.10a
有效磷 AP/(mg/kg)	0—10	2.09±0.40a	2.20±0.27a	1.86±0.17a
Available phosphorus	10—20	1.96±0.15c	2.24±0.21b	2.60±0.22a

同行不同字母表示不同处理差异达到 0.05 显著水平,图中数据为平均值±标准差

土壤 DOC 测定,用去离子水浸提 5 g 鲜土,水土比为 4:1,振荡离心后,经 0.45 μm 滤膜抽滤,用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, Shimadzu, 日本)测定滤液中有有机碳含量。土壤 DON 测定,称取 5 g 鲜土加入 20 mL 0.5 mol/L K₂SO₄,振荡 0.5 h 后 4000 r/min 离心 10 min,经定量滤纸过滤,用连续流动分析仪(Skalar san+, Skalar, 荷兰)测定滤液中的 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,其计算公式为: DON = TN - NH₄⁺-N - NO₃⁻-N。土壤矿质氮

测定,称取 5 g 鲜土加入 20 mL 2 mol/L KCl 进行浸提,振荡离心后,上清液经定量滤纸过滤,用连续流动分析仪 (Skalar san++, Skalar, 荷兰) 测定滤液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。土壤全磷测定,称取 800 mg 过 100 目土壤样品用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮法脱硅定容到 100 mL,静置 24 h,获取上清液,用连续流动分析仪 (skalar san++, Skalar, 荷兰) 测定。土壤速效磷测定,称取 3 g 风干土,加入 30 mL M3 浸提液,振荡 5 min 后 8000 r/min 离心 5 min,上清液经无磷滤纸过滤,用连续流动分析仪 (skalar san++, Skalar, 荷兰) 测定。

1.4 内生长环布设取样分析

2014 年 7 月,在每个小区的中心位置布设内径 20 cm、高 20 cm 的内生长环,外环为 2 mm×2 mm 正方形孔径的环网,中间放置一内径 10 cm 的 PVC 管并用沙袋充填,内环 PVC 管主要目的是便于取样 (图 1)。取样时,取走沙袋后,可以较轻易地取出 PVC 管,然后用小刀对内生长环内的土壤进行取样,分 0—10、10—20 cm 取出内生长环的土壤,挑出所有根系后将土分层回填至内生长环。并于 2015 年 1 月 (2014 年 7 月布设)、2015 年 7 月 (2015 年 1 月布设)、2016 年 1 月 (2015 年 7 月布设) 和 2016 年 7 月 (2016 年 1 月布设) 从内生长环中取出细根,并立即在野外把细根挑出,然后带回实验室清洗干净。每次取样两个土层细根混合到一起后根据细根的颜色、外形等区分出活死根,再按 0—1、1—2 mm 分出径级。样品 100℃ 杀青 3 min 后,于 65℃ 下烘干。



图 1 内生长环法

Fig.1 Root in-growth donut

直接杀青烘干的细根在获取重量后使用球磨仪磨碎,称取 10 mg 用元素分析仪 (vario EL III Element Analyzer, 德国) 测定杉木细根中 C、N 浓度;称取 250 mg 细根样品用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮法脱硅定容到 100 mL,静置 24 h,获取上清液,用连续流动分析仪 (skalar san++, Skalar, 荷兰) 测定杉木细根 P 浓度。

1.5 杉木幼树树高、地径

2015 年 1 月、7 月,2016 年 1 月、7 月分别测量了 CK、LN、HN 3 个处理杉木幼树的树高、地径,见图 2。

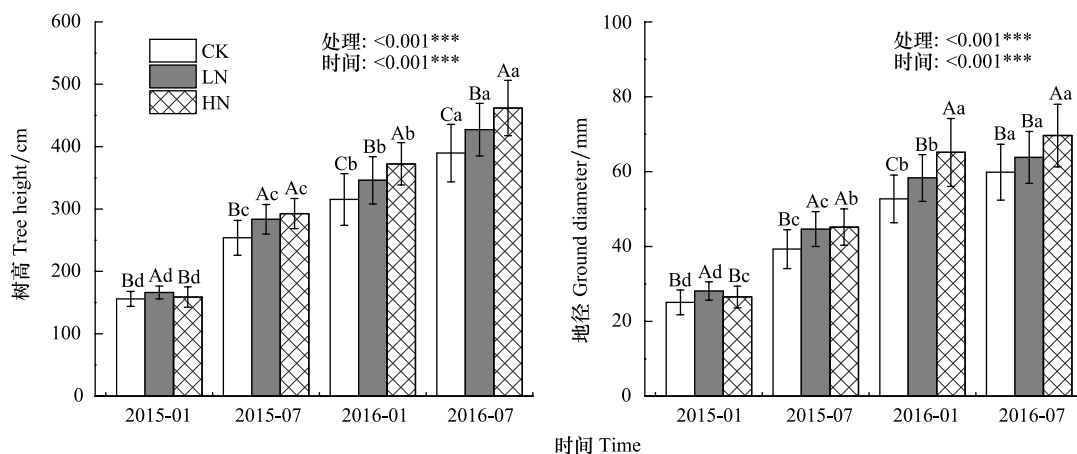


图 2 不同时间不同处理杉木幼树的树高、地径

Fig.2 The tree height and ground diameter of Chinese fir seedlings under different times

CK, 对照处理 control; LN, 低氮添加 low nitrogen treatment; HN, 高氮添加 high nitrogen treatment; 不同大写字母表示同一取样时间不同处理间差异显著, 小写字母表示同一处理不同取样时间间差异显著 ($P < 0.05$), 图中数据为平均值±标准差

1.6 数据分析

利用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,显著性水平设定为 $P = 0.05$ 。采用重复测量方差分析探讨氮

添加、径级和取样时间对细根 C、N、P 浓度及 C:N 比、N:P 比的影响;采用单因素方差分析加多重比较 Tukey HSD 检验同一取样时间不同处理间,以及同一处理不同取样时间细根 C、N、P 浓度及 C:N 比、N:P 比、树高和地径的差异。利用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果

2.1 N 添加对细根 C、N、P 浓度的影响

N 添加对细根 C 浓度的影响达到了极显著水平($N: P < 0.001$),且其影响因不同取样时间($T \times N: P < 0.001$)和不同径级($N \times D: P < 0.05$)而异(表 2)。LN 处理在 2015 年 1 月、7 月显著降低 0—1 mm 细根 C 浓度,在 2015 年 7 月显著降低 1—2 mm 细根 C 浓度;HN 处理在 2015 年 1 月、7 月显著降低 0—1、1—2 mm 细根 C 浓度,但在 2016 年 1 月、7 月显著增加 0—1、1—2 mm 细根 C 浓度;随着杉木幼树的生长细根 C 浓度逐渐增加(图 3)。

N 添加对细根 N 浓度的影响达到了极显著水平($N: P < 0.01$),且不因取样时间($T \times N: P = 0.137$)和径级($N \times D: P = 0.629$)而异(表 2)。LN 处理在 2016 年 7 月显著降低 0—1 mm 细根 N 浓度,在 2016 年 1 月显著降低 1—2 mm 细根 N 浓度;HN 处理在 2015 年 1 月、2016 年 1 月、7 月显著增加 0—1 mm 细根的 N 浓度,在 2015 年 1 月显著增加 1—2 mm 细根 N 浓度(图 3)。

N 添加对细根 P 浓度的影响因不同取样时间($T \times N: P < 0.01$)而异(表 2)。LN 处理在 2016 年 1 月、7 月显著降低 0—1 mm 细根 P 浓度,在 2016 年 1 月降低 1—2 mm 细根 P 浓度;HN 处理在 2016 年 1 月、7 月显著降低 0—1 mm 细根 P 浓度,对 1—2 mm 细根 P 浓度无影响(图 3)。

表 2 取样时间、N 添加和径级对细根化学组成指标影响的重复测量方差分析的 P 值表

指标 Index	变异来源 Sources of variation						
	T	N	D	T×N	T×D	N×D	T×N×D
C	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.034	0.059
N	< 0.001	0.006	< 0.001	0.137	0.060	0.629	0.978
P	0.341	0.138	< 0.001	0.001	0.001	0.402	0.206
C/N	< 0.001	0.017	< 0.001	0.033	0.004	0.622	0.788
N/P	< 0.001	0.004	0.157	0.036	0.004	0.141	0.726

T: 取样时间, Time; N: 氮添加处理, Nitrogen addition; D: 径级, Diameter class

2.2 N 添加对细根 C:N 比、N:P 比的影响

N 添加对细根 C:N 比的影响达到了显著水平($N: P < 0.05$),且因不同取样时间($T \times N: P < 0.05$)而异,但不因径级($N \times D: P = 0.622$)而异(表 2)。LN 处理在 2016 年 7 月显著增加 0—1 mm 细根 C:N 比,在 2016 年 1 月、7 月显著增加 1—2 mm 细根 C:N 比;HN 处理在 2015 年 1 月、2016 年 1 月显著降低 0—1 mm 细根 C:N 比,在 2015 年 1 月显著降低 1—2 mm 细根 C:N 比(图 4)。

N 添加对细根 N:P 比的影响达到了显著水平($N: P < 0.01$),且其影响因不同取样时间($T \times N: P < 0.05$)而异,但不因径级($N \times D: P = 0.141$)而异(表 2)。4 次取样 LN 处理对 0—1、1—2 mm 细根 N:P 比均无显著影响;HN 处理在 2015 年 7 月、2016 年 1 月、7 月显著增加 0—1 mm 细根 N:P 比,在 2015 年 1 月、2016 年 1 月显著增加 1—2 mm 细根 N:P 比。

3 讨论

3.1 N 添加对细根 C、N、P 浓度的影响

本研究结果显示,N 添加在 2015 年降低了细根的 C 浓度,增加了细根 N 浓度(特别是 HN 处理),这与 Ostertag 和 Zhu 等研究结果一致^[27-28]。可能是因为 N 添加增加了土壤 N 有效性,导致细根吸收 N 浓度增

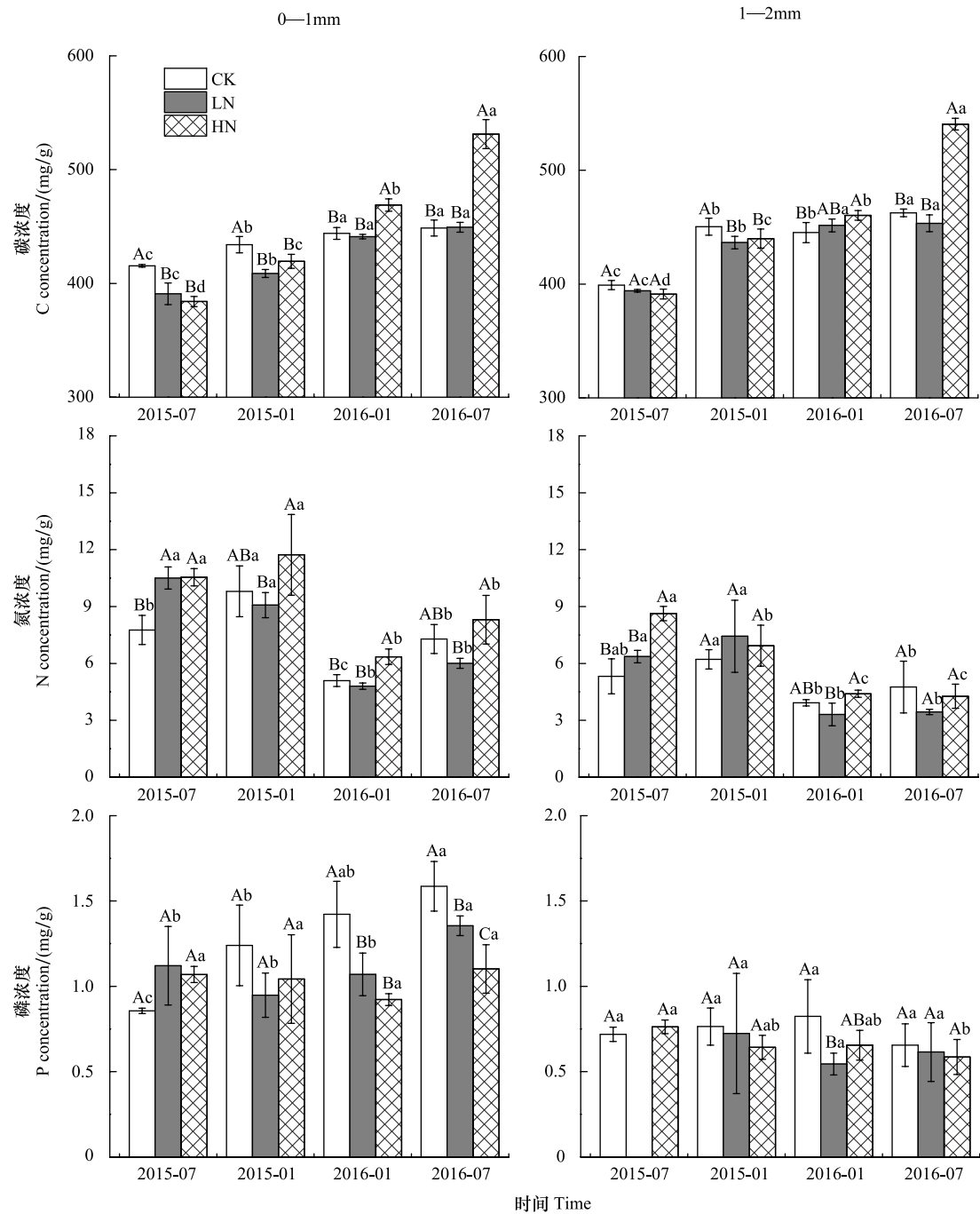


图3 不同时间不同处理各径级的细根 C、N、P 浓度

Fig.3 C、N、P concentrations in fine roots of different diameter classes under different times

加^[9,29],由于细根 N 浓度提高从而相对地降低了细根组织的 C 浓度;另外,细根组织 N 浓度与细根呼吸速率呈高度正相关^[30],研究表明分配到根系中的 C 有 75%用于(包括菌根在内的)细根呼吸^[31],所以细根 N 浓度提高了细根呼吸作用,消耗了根中大量非结构性碳水化合物(NSC)^[32],从而导致细根 C 浓度降低,这在 HN 处理中表现的更突出;或者是因为 N 添加后 C 分配格局发生改变,更多的 C 用于维持地上部分的生长^[33],导致林木生长加快(图 2),但使地下 C 分配比例相对降低,从而导致细根 C 浓度降低。

本研究还发现,HN 处理后期显著提高细根 C 浓度,这与之前的研究结果不一致^[34]。可能是因为 HN 增加常引起土壤酸化^[35],会导致根外皮层细胞中大量的酚类物质沉淀,加速外层细胞的木质化或栓质化^[36],导

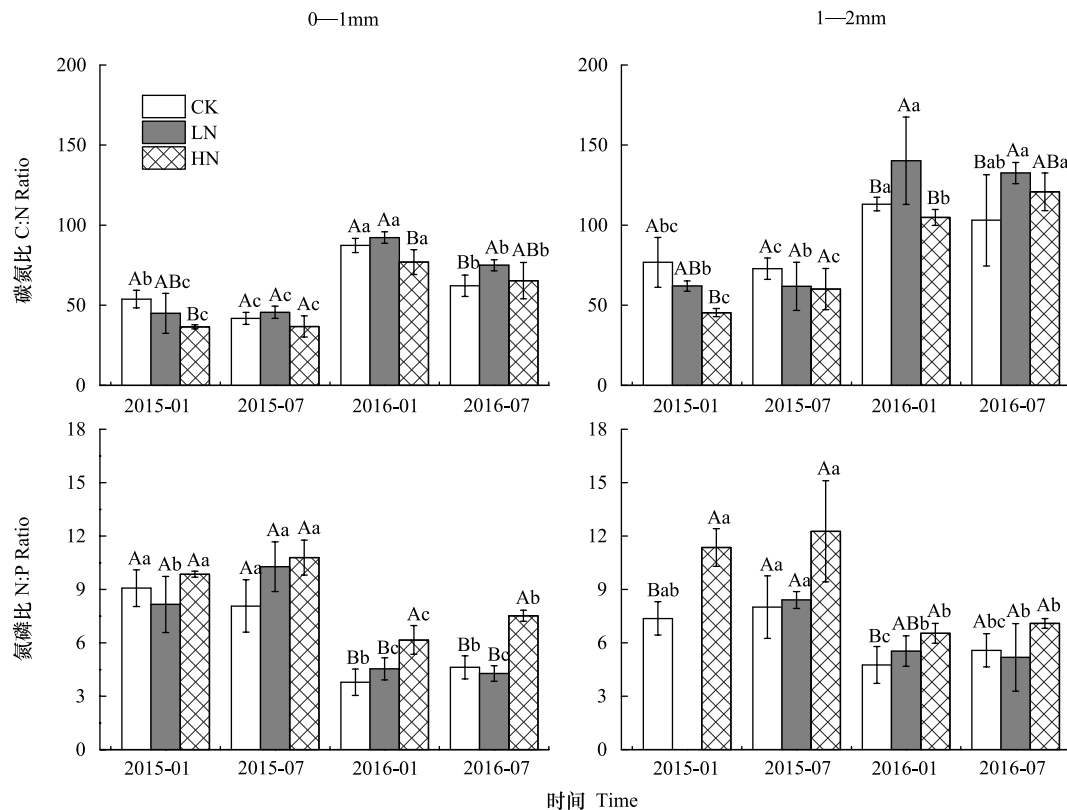


图4 不同时间不同处理各径级的细根 C:N 比、N:P 比

Fig.4 C:N ratios, N:P ratios in fine roots of different diameter classes under different times

致细根 C 浓度升高。与 HN 相比,2016 年 1 月和 7 月 LN 处理对细根 C 浓度的影响不显著,可能是因为 LN 处理对土壤中的铵态 N 没有显著影响,而显著增加了土壤中硝态 N (表 1)。植物在利用硝态 N 时需要消耗更多的 C^[37-38],导致细根中 C 浓度没有显著增加。同时本研究结果表明,2016 年细根 N 浓度较 2015 年低,可能是因为 2016 年杉木生长较快、苗木个体较大、细根吸收的 N 更多用于植物地上的生长以及杉木生长的稀释作用引起的^[39]。而 3 个处理细根 C 浓度均随着时间的增加而呈增加趋势,这可能与随着杉木幼树的成长,细根 N 浓度降低、且含 C 量较高的单宁酸、木质素、纤维素在细根中积累有关^[40]。

N 添加对细根元素化学计量学的影响研究主要集中在对细根 C、N 的影响上,而对细根 P 浓度的影响研究较少。本研究中,2016 年两次取样中 N 添加显著降低了 0—1 mm 细根 P 浓度,这与 Sardans 等人的研究结果一致^[41],即高水平的 N 添加增加了细根对 N 的吸收,但降低了细根对 P 的吸收。N 添加促进杉木的生长而产生的稀释作用使细根中 P 浓度相对降低^[38]。此外,细根对 P 元素的吸收更多的需要菌根的帮助^[42],但随着土壤有效 N 含量的增加,植物吸收 N 素的成本降低,对 AM 真菌的依赖性就会减弱,使菌根侵染降低^[43-44],本研究中 LN、HN 处理表层土壤硝态 N 分别增加了 3 倍、5.8 倍,HN 处理表层土壤铵态 N 增加了 3.8 倍,N 添加后土壤 N 有效性水平提高,可能使细根菌根菌侵染率降低^[45],这也间接导致细根对 P 元素的吸收相对降低。

3.2 N 添加对细根 C:N 比、N:P 比的影响

有研究表明,细根 C:N 比过大,微生物分解利用减慢,需要消耗土壤中的有效 N,而细根 C:N 比降低则有利于在细根死亡后被微生物分解,促进养分循环^[42]。本研究结果表明,LN 处理 2016 年 7 月增加了 0—1 mm 细根 C:N 比,2016 年 1 月和 7 月增加了 1—2 mm 细根的 C:N 比;这主要与 LN 处理中杉木生长的稀释效应导致细根 N 浓度值低于对照有关。HN 处理只在 2015 年 1 月和 2016 年 1 月降低 0—1 mm 细根 C:N 比、2015 年 1 月降低 1—2 mm 细根 C:N 比,这主要与 HN 处理导致细根 N 的积累有关。这些结果说明 LN 和 HN 处理

对细根的 C:N 比的影响存在一定的相反趋势,从而可能对细根的分解及其在生态系统养分循环中的作用产生不同的影响。本研究还发现随着杉木幼树的生长,细根 C:N 比有增加的趋势,这可能也与生长的稀释效应导致细根 N 浓度降低有关。

4 次取样 LN 对细根 N:P 比均无显著影响,但 HN 在多数取样时间中显著增加了 0—1 mm 和 1—2 mm 细根 N:P 比,这主要是因为 HN 处理细根 N 浓度的升高和 P 浓度的降低导致,表明了 HN 可能导致植物体营养元素失衡,特别是受 P 营养的限制可能更为强烈^[34]。Yuan 等^[46]对全球细根进行研究发现细根 N:P 比值在 13—18 之间;马玉珠等^[47]通过对中国植物细根 C、N、P 化学计量学的研究得出细根 N:P 比平均为 14.3,粗根 N:P 比平均为 11.7。通常认为 N:P 比低于 14 说明受 N 限制,N:P 比高于 16 受 P 限制,大于 14 小于 16 说明受 N、P 共同限制^[48]。本研究中,0—1 mm 细根 N:P 比在 3.8—10.8 之间;1—2 mm 细根 N:P 比在 4.8—12.3 之间,低于全球及中国平均细根 N:P 比,说明在 N 沉降比较严重的中国亚热带地区,N 元素可能仍是处于幼龄杉木的限制性因素,因为幼龄杉木处于快速生长中,特别是构建树冠需要大量的 N 素,这从 N 添加处理显著促进杉木生长中可以反映出来(图 2)。本研究中,2016 年 3 个处理 0—1、1—2 mm 细根 N:P 比显著低于 2015 年,可能是由于苗木生长对 N 的稀释效应大于对 P 的稀释效应所致。

4 结论

在两年四次取样中,N 添加在 2015 年降低细根 C 浓度,此后低 N 添加处理无影响,但高 N 添加则在 2016 年增加了细根 C 浓度,说明 N 添加后植物可能调整了地下 C 的分配。高 N 添加提高了细根(特别是 0—1 mm 细根)N 浓度,但低 N 添加则无显著影响,甚至在 2016 年 7 月由于生长稀释效应而显著降低细根 N 浓度。N 添加在 2015 年对细根 P 浓度没有显著影响,但在 2016 年导致细根(特别是 0—1 mm 细根)P 浓度降低,这可能与苗木生长对 P 的稀释效应有关。低 N 处理在 2016 年显著提高细根的 C:N 比,而高 N 处理则在 2015 年显著降低细根的 C:N 比,说明不同水平 N 添加对生态系统 C 和养分循环产生的影响不尽相同,甚至产生相反影响。低 N 处理对细根 N:P 比没有显著影响,而高 N 处理则在大部分取样时间里显著增加了细根 N:P 比,高 N 添加可能导致植物体营养元素失衡。同时,不同处理细根 C 浓度、C:N 比均随着时间的增加呈增加趋势,而细根 N 浓度和 N:P 比呈降低趋势,这可能亦与苗木生长对细根 N 浓度的稀释效应有关。本研究表明,N 添加处理对杉木幼树细根化学计量学特征的影响因不同 N 添加水平而异,并受幼树生长的稀释效应的调节。

本文的研究结论是基于苗木两年 4 次取样的测定结果,由于苗木个体发育对细根化学计量学具有一定影响,因而本研究中 N 沉降对杉木幼苗细根化学计量学的影响是否能够外推至成年林木还有待于进一步的验证,未来的研究亦需要在更长的时间尺度上进一步揭示 N 沉降对杉木细根化学计量学的影响。

参考文献(References):

- [1] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 659-662.
- [2] IPCC. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Lamarque J F, Kiehl J T, Brasseur G P, Butler T, Cameron-Smith P, Collins W J, Collins W D, Granier C, Hauglustaine D, Hess P G, Holland E A, Horowitz L, Lawrence M G, McKenna D, Merilees P, Prather M J, Rasch P J, Rotman D, Shindell D, Thornton P. Assessing future nitrogen deposition and carbon cycle feedback using a multimodel approach: Analysis of nitrogen deposition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D19): 2657-2677.
- [4] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [5] Jenkinson D S, Goulding K, Powlson D S. Nitrogen deposition and carbon sequestration. *Nature*, 1999, 400(6745): 629-629.
- [6] 吴伊波, 车荣晓, 马双, 邓永翠, 朱敏健, 崔骁勇. 高寒草甸植被细根生产和周转的比较研究. *生态学报*, 2014, 34(13): 3529-3537.

- [7] Norby R J, Jackson R B. Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist*, 2010, 147(1): 3-12.
- [8] Kochsiek A, Tan S, Russo S E. Fine root dynamics in relation to nutrients in oligotrophic Bornean rain forest soils. *Plant Ecology*, 2013, 214(6): 869-882.
- [9] Nadelhoffer K J, Norby R, Fitter A, Jackson R. The potential effects of nitrogen deposition on fine-root production in forest ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 131-139.
- [10] Hodge A. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *The New phytologist*, 2004, 162(1): 9-24.
- [11] Searing J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: A review and perspectives. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 1-39.
- [12] 荣钺钺, 刘京涛, 夏江宝, 陆兆华, 郭彩虹. 莱州湾湿地桤柳叶片 N、P 生态化学计量学特征. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 3032-3037.
- [13] Song Z L, Liu H Y, Zhao F J, Xu C Y. Ecological stoichiometry of N:P:Si in China's grasslands. *Plant and Soil*, 2014, 380(1/2): 165-179.
- [14] 王娜, 程瑞梅, 肖文发, 沈雅飞. 三峡库区马尾松根和叶片的生态化学计量特征. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 536-544.
- [15] Hendricks J J, Aber J D, Nadelhoffer K J, Hallett R D. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems. *Ecosystems*, 2000, 3(1): 57-69.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Fan P P, Guo D L. Slow decomposition of lower order roots: a key mechanism of root carbon and nutrient retention in the soil. *Oecologia*, 2010, 163(2): 509-515.
- [19] Bouma T J, Visser R D, Janssen J H J A, De, Kock M J, Van, Leeuwen P H, Lambers H. Respiratory energy requirements and rate of protein turnover in vivo determined by the use of an inhibitor of protein synthesis and a probe to assess its effect. *Physiologia Plantarum*, 1994, 92(4): 585-594.
- [20] 王延平, 许坛, 朱婉芮, 王华田, 张光灿, 李传荣, 姜岳忠. 杨树细根碳、氮含量的季节动态及代际差异. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3268-3276.
- [21] Mo Q F, Zou B, Li Y W, Chen Y, Zhang W X, Mao R, Ding Y Z, Wang J, Lu X K, Li X B, Tang J W, Li Z A, Wang F M. Response of plant nutrient stoichiometry to fertilization varied with plant tissues in a tropical forest. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14605.
- [22] Peñuelas J, Sardans J, Rivas - Ubach A, Janssens I A. The human - induced imbalance between C, N and P in Earth's life system. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 3-6.
- [23] 樊后保, 廖迎春, 刘文飞, 袁颖红, 李燕燕, 黄荣珍. 模拟氮沉降对杉木幼苗养分平衡的影响. *生态学报*, 2011, 31(12): 3277-3284.
- [24] 史顺增, 熊德成, 冯建新, 许辰森, 钟波元, 邓飞, 陈云玉, 陈光水, 杨玉盛. 模拟氮沉降对杉木幼苗细根的生理生态影响. *生态学报*, 2017, 37(1): 74-83.
- [25] 中国林业局. 全国森林资源统计(1999-2003). 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [26] 章伟, 高人, 陈仕东, 马红亮, 高艳, 朱祥妹, 尹云锋, 杨玉盛, 官惠玲. 米槠天然林土壤真菌对 N₂O 产生的贡献. *亚热带资源与环境学报*, 2013, 8(2): 28-34.
- [27] Ostertag R. Effects of nitrogen and phosphorus availability on fine-root dynamics in Hawaiian montane forests. *Ecology*, 2001, 82(2): 485-499.
- [28] Zhu F, Yoh M, Gilliam F S, Lu X K, Mo J M. Nutrient limitation in three lowland tropical forests in southern China receiving high nitrogen deposition: insights from fine root responses to nutrient additions. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82661.
- [29] Nadelhoffer K J, Johnson L, Laundre J, Giblin A E, Shaver G R. Fine root production and nutrient content in wet and moist arctic tundras as influenced by chronic fertilization. *Plant and Soil*, 2002, 242(1): 107-113.
- [30] Burton A, Pregitzer K, Ruess R, Hendrick R, Allen M. Root respiration in North American forests: effects of nitrogen concentration and temperature across biomes. *Oecologia*, 2002, 131(4): 559-568.
- [31] Högberg P, Nordgren A, Ågren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest. *Oecologia*, 2002, 132(4): 579-581.
- [32] 熊德成, 黄锦学, 杨智杰, 卢正立, 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升. 亚热带六种天然林树种细根养分分异质性. *生态学报*, 2012, 32(14): 4343-4351.
- [33] Pregitzer K S. Woody plants, carbon allocation and fine roots. *The New Phytologist*, 2003, 158(3): 421-424.
- [34] Li Y, Niu S, Yu G. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta- analysis. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 934-943.
- [35] Iii F S C, Matson P A, Mooney H A. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2011.

- [36] Kraus T E C, Zasoski R J, Dahlgren R A. Fertility and pH effects on polyphenol and condensed tannin concentrations in foliage and roots. *Plant and Soil*, 2004, 262(1/2): 95-109.
- [37] Rothstein D E, Zak D R, Pregitzer K S, Curtis P S. Kinetics of nitrogen uptake by *Populus tremuloides* in relation to atmospheric CO₂ and soil nitrogen availability. *Tree Physiology*, 2000, 20(4): 265-270.
- [38] 韩兴国, 李凌浩, 黄建辉. 生物地球化学概论. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [39] Yuan Z Y, Chen H Y H. Decoupling of nitrogen and phosphorus in terrestrial plants associated with global changes. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 465-469.
- [40] Xiong Y M, Fan P P, Fu S L, Zeng H, Guo D L. Slow decomposition and limited nitrogen release by lower order roots in eight Chinese temperate and subtropical trees. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2): 19-31.
- [41] Sardans J, Grau O, Chen H Y H, Janssens I A, Ciais P, Piao S, Peñuelas J. Changes in nutrient concentrations of leaves and roots in response to Global Change factors. *Global Change Biology*, 2017, 23(9): 3849-3856.
- [42] 钟波元, 熊德成, 史顺增, 冯建新, 许辰森, 邓飞, 陈云玉, 陈光水. 隔离降水对杉木幼苗细根生物量 and 功能特征的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2807-2814.
- [43] Egerton-Warburton L M, Allen E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 484-496.
- [44] 黄园园, OLBRECHT L, 杨晓霞, 贺金生. 养分添加对青藏高原高寒草甸丛枝菌根真菌的影响. *北京大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(5): 911-918.
- [45] Liu B T, Li H B, Zhu B, Koide R T, Eissenstat D M, Guo D L. Complementarity in nutrient foraging strategies of absorptive fine roots and arbuscular mycorrhizal fungi across 14 coexisting subtropical tree species. *New Phytologist*, 2015, 208(1): 125-136.
- [46] Yuan Z Y, Chen H Y H, Reich P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus. *Nature Communications*, 2011, 2: 344-344.
- [47] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 卢宏典, 郭炳桥, 郑媛, 李曼, 程栋梁. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 159-166.
- [48] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.