

## 模拟氮沉降对天山云杉细根分解 及其养分释放的影响

李吉玫<sup>1,2</sup>, 张毓涛<sup>1</sup>, 李建贵<sup>3</sup>, 李翔<sup>1</sup>, 芦建江<sup>1</sup>

(1 新疆林业科学院 森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063; 2 新疆林业科学院博士后工作站, 乌鲁木齐 830063; 3 新疆农业大学, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 采用野外模拟试验, 设计 4 种氮处理——对照(不施氮, CK)、低氮(施氮  $5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , LN)、中氮(施氮  $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , MN)、高氮(施氮  $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , HN), 研究氮沉降对天山云杉细根分解及养分释放的影响。结果表明: (1) 不同氮处理分解 2 年后天山云杉细根残留率依次为 74.044% (HN)、71.967% (MN)、68.156% (CK)、61.933% (LN), 且差异显著。(2) 天山云杉的细根月分解速率在试验前期不同氮处理下规律不明显; 而在试验后期呈现为对照 > 中氮 > 低氮 > 高氮。(3) 4 种氮处理下天山云杉细根分解 50% 需要的时间依次为 3.31 年 (LN)、3.67 年 (CK)、4.28 年 (MN)、4.64 年 (HN), 分解 95% 需要的时间依次为 14.39 年 (LN)、15.93 年 (CK)、18.58 年 (MN) 和 20.17 年 (HN)。(4) 天山云杉细根 C 元素迁移模式总体表现为直接释放, N 元素为富集-释放模式, 残留率呈现波动式下降趋势。(5) 不同氮处理下天山云杉细根分解率与 C 元素浓度间均呈线性负相关关系; 对照和低氮处理下, 天山云杉细根分解率与 N 元素浓度间均为线性负相关关系, 中氮和高氮处理下, 细根分解率随 N 元素浓度的增加呈先增加后降低的趋势。

**关键词:** 氮沉降; 细根分解; 养分释放; 天山云杉; 干旱区山地森林

**中图分类号:** Q948.1

**文献标志码:** A

## Effect of Simulated Nitrogen Deposition on the Fine Root Decomposition and Related Nutrient Release of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica*

LI Jimei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yutao<sup>1</sup>, LI Jiangu<sup>3</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, LU Jianjiang<sup>1</sup>

(1 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China; 2 Work Station of Science and Technique for Post-doctorate in Institute of Forest Ecology, Urumqi 830063, China; 3 Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** A field simulated experiment was conducted to study the effects of nitrogen deposition on the fine root decomposition and related nutrient release of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica*. Four treatments were designed as CK (control, Non-addition nitrogen), LN (Low nitrogen,  $5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), MN (Mid nitrogen,  $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) and HN (High nitrogen,  $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ). The results showed that: (1) After two years decomposition, the fine root remaining percentage of *P. schrenkiana* var. *tianshanica* ranked as HN (74.044%), MN (71.967%), CK (68.156%), LN (61.933%), and the difference was significant in four treatments. (2) The rule of monthly decomposition rate in former stage was not obvious under four treatments, while it was CK > MN > LN > HN in final stage. (3) The required time to fine root decomposition 50% ranked as LN (3.31 a), CK (3.67 a), MN (4.28 a), HN (4.64 a), while it was 14.39 a (LN), 15.93 a (CK), 18.58 a (MN) and 20.17 a (HN) for decomposition 95%. (4) The transfer model for C in fine root was direct releasing, while it was riching-releasing model for N. (5) The relationships between fine root decomposition rate and C concentration in fine root were negative linear correlation in four treatments; the relationships between fine root de-

收稿日期: 2014-07-24; 修改稿收到日期: 2014-11-14

基金项目: 新疆林业科学院院管项目(2014016); 2013 年新疆维吾尔自治区科技计划项目(201331125)

作者简介: 李吉玫(1980—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事干旱区森林生态研究。E-mail: jimeili@126.com

composition rate and N concentration were negative linear correlation in CK and LN. The decomposition rate was increased first and decreased then as the N concentration increasing in MN and HN.

**Key words:** nitrogen decomposition; fine root decomposition; nutrient release; *Picea schrenkiana* var. *tianshanica*; arid mountain forest

干旱区温带森林通常表现为氮缺乏型生态系统<sup>[1]</sup>,然而在过去一个世纪中,受人类活动的干扰,通过大气干湿沉降进入陆地生态系统的含氮化合物大量增加。而且氮沉降量在未来几十年将继续增加,还呈现出全球化趋势<sup>[2-3]</sup>。氮沉降迅速增加对陆地生态系统的过程和特征产生了巨大影响<sup>[4]</sup>。受全球气候变化研究的推动,氮沉降对陆地生态系统的影响备受关注<sup>[5-6]</sup>。已有研究表明,氮沉降对陆地生态系统及其过程的影响主要有正、负和无影响 3 种,这主要取决于氮沉降对地上生态系统和地下生态系统两部分过程的综合影响<sup>[1]</sup>。

细根作为地下生态系统的主体,是植物吸收水分和养分的重要器官,虽然它在植物总生物量中的比重比较小,但在森林生态系统净生产力、碳和养分循环中的作用巨大<sup>[7-8]</sup>。同时与植物地上部分各个器官相比,细根对外界环境的胁迫更加敏感,对环境变化具有指示作用。细根的相关研究受到生态学界的普遍关注,尤其成为森林碳循环研究热点之一<sup>[9]</sup>。国内有关细根生长<sup>[10-11]</sup>、生物量<sup>[12]</sup>、分布以及季节变化<sup>[13]</sup>等方面的研究较多,而细根分解的相关研究并不多见。细根分解作为细根周转的一个重要环节,控制着细根周转率和养分循环速率,是全球碳预算的重要组成部分,是陆地生态系统碳和养分输入的主要途径,尤其是深层土壤中有机质的重要来源,在地下生态过程中发挥着不可替代的作用<sup>[9,14]</sup>。因此研究细根分解过程及养分的释放对于了解森林生态系统生物地球化学循环具有重要意义。目前对细根分解的研究主要集中在分解过程、影响分解的因子等方面<sup>[9,14]</sup>。但关于氮沉降对细根分解及其养分释放的影响的研究方面还存在着很大的局限性,尤其是在干旱区山地森林,许多问题有待深入研究。

天山云杉林(*Picea schrenkiana* var. *tianshanica*)是新疆山地森林的主要组成部分,在干旱区涵养水源、保育土壤、保护生物多样性和固碳释氧等方面发挥着重要的生态功能<sup>[15-16]</sup>。目前国内外学者对天山云杉的研究主要集中在生物量分配<sup>[17-18]</sup>、种群分布格局<sup>[19]</sup>、水源涵养功能<sup>[13]</sup>等方面,缺乏对天山云杉细根的相关研究。有研究表明天山中部氮沉降量约为  $6.82 \sim 3.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[20-21]</sup>,平均达  $5.33$

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。同时,天山中部天山云杉林分布的部分区域由于重大工程的施工,如煤矿开采、水泥厂的修建等造成该区域氮沉降量有逐渐增加的趋势。本研究以国家林业局天山森林生态系统定位研究站为依托,通过模拟氮沉降,研究氮沉降对天山云杉细根分解及其养分释放的影响,试图为进一步研究干旱区氮沉降对森林生态系统养分循环以及更好地预测生态系统氮循环对氮沉降增加的响应等提供科学依据。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

天山森林生态系统定位研究站是国家森林生态系统定位研究网络(CFERN)之一,地处天山山脉中段北坡,位于乌鲁木齐县水西沟镇,地理坐标  $87^{\circ}27'28.5'' \sim 87^{\circ}28'47.7''\text{E}$ ,  $43^{\circ}24'48.3'' \sim 43^{\circ}26'17.9''\text{N}$ ,海拔  $1\,908 \sim 2\,960 \text{ m}$ 。该地区属温带大陆性气候,年均气温  $2.0^{\circ}\text{C}$ ,年降水量  $400 \sim 600 \text{ mm}$ ,雨季集中在  $6 \sim 8$  月份,年蒸发量  $980 \sim 1\,150 \text{ mm}$ ,年均相对湿度  $65\%$ ,干燥度  $1.4$ ,无霜期  $89 \text{ d}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $1\,170.5^{\circ}\text{C}$ 。林下土壤为山地灰褐色森林土,腐殖质层较厚。该区植被类型是以天山云杉为主的温带针叶林,森林覆盖率达  $60\%$ 。

### 1.2 样地设置

2011 年秋季(9 月底)在研究区设置固定样地 12 块,面积均为  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,每个样地间设置  $1 \text{ m}$  的缓冲带,并进行林分状况和土壤养分等调查(表 1)。样地内主要地被植物有:天山雨衣草(*Alchenilla tianschanica* Juz.)、羊角芹(*Aegopodium podagraria* L.)、天蓝岩苣[*Cicerbita azurea* (Ledeb.) Beauv]、木地肤(*Kochia prostrata*)、羊茅(*Festuca ovina*)、老鹤草(*Geranium dahuricum* DC.)等。

### 1.3 试验设计

**1.3.1 分解试验** 2011 年秋季(9 月底)在研究区随机挖取天山云杉新鲜细根(直径小于  $2 \text{ mm}$ ),带回实验室用蒸馏水冲洗干净,在  $65^{\circ}\text{C}$  下烘至恒重。分解试验采用野外埋藏分解袋法<sup>[3,8]</sup>,在每个规格为  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 、网孔为  $1 \text{ mm}$  的分解袋装入  $7.5 \text{ g}$  烘干细根,共 216 袋。装有细根的分解袋均匀平行

表 1 各处理样地的林分土壤养分状况(平均值±标准误)  
Table 1 Background values of the stand and soil nutrient(mean±SE)

处理 Treatment	树龄 Age/a	林分密度 Forest density (Number·hm <sup>-2</sup> )	胸径 DBH /cm	树高 Tree height /m	土壤全氮 Soil total nitrogen (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全磷 Soil total phosphorus (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全钾 Soil total potassium (g·kg <sup>-1</sup> )
对照 CK	73±8	1 103±109	15.1±4.3	16.3±4.2	8.97±0.86	0.63±0.06	20.98±2.31
低氮 LN	69±12	964±94	17.9±5.2	17.9±6.7	8.53±0.79	0.69±0.10	20.57±1.86
中氮 MN	78±7	882±112	18.3±6.9	15.3±3.6	8.42±0.98	0.58±0.07	20.03±3.72
高氮 HN	73±7	931±137	17.5±8.1	15.9±2.1	8.44±1.00	0.63±0.06	22.18±3.08

地埋于各样地上、中和下部,埋藏深度为土壤表层以下 5~10 cm 处。2012 年和 2013 年 5 月中、7 月中和 9 月中(每年 11 月到第二年的 4 月为大雪封山季,无法进入林区)在每个样地内定时收集细根分解袋各 3 个,将收集的样品用蒸馏水冲洗干净,在 65℃下烘干至恒重,计算其失重,并取出部分烘干样品,用于测定样品中的全 C 和全 N 含量。参考文献[22]计算细根分解率、残留率以及养分释放率等。

- (1)残留率: $D=\frac{W_i}{W_0}\times 100\%$
- (2)月分解率: $D_m=\frac{\Delta W}{W_0}\times 100\%\times \frac{1}{N_m}$
- (3)养分残留率: $R=\frac{(C_i\times M_i)}{(C_0\times M_0)}\times 100\%$
- (4)凋落物分解指数模型: $y=ae^{-kt}$
- (5)分解 50%所需要的时间: $T_{0.5}=\frac{\ln 0.5}{(-k)}$
- (6)分解 95%所需要的时间: $T_{0.95}=\frac{\ln 0.05}{(-k)}$

式中, $D$ 为细根残留率(%); $W_i$ 为第*i*个月细根干重(g); $W_0$ 为投放时分解袋内细根初始干重(g); $D_m$ 为细根月分解率(%); $\Delta W$ 为测定时所取细根干重减少量(g); $N_m$ 为第*i*次取样和第*i*-1次取样中间间隔的月份数; $R$ 为第*i*个月所取细根样品养分元素的残留量; $C_i$ 为第*i*次取样时养分含量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ); $M_i$ 为*i*次取样时细根总干重; $C_0$ 为初始养分含量( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ); $M_0$ 初始细根总干重; $y$ 为细根质量残留率(%); $a$ 为拟合参数; $t$ 为分解时间(月); $k$ 为细根分解系数( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ )。

**1.3.2 氮素添加** 参照国内外野外模拟氮沉降梯度<sup>[7-9]</sup>,同时结合已有学者对天山中部氮沉降监测的结果,本试验设计 4 种氮处理:CK(对照,不施氮)、LN(低氮,5  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )、MN(中氮,10  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )、HN(高氮,15  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),每种处理重复 3 次。以尿素[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]作为氮源。于 2011 年 9 月底(放置好分解袋后)、2012 年 5 月初、2013 年 5 月初将尿素均匀地洒在各个样地中,模拟

氮沉降对天山云杉细根分解以及养分释放的影响。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析(one way ANOVA)和最小极差法(LSD)检验 4 种处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对天山云杉细根干重残留率变化影响

从图 1 可知,细根分解呈现出明显的阶段性和季节性。试验早期(2011 年 9 月~2012 年 7 月)细根干重残留率依次为中氮>对照>低氮>高氮。分解 2 年后,4 种氮处理间细根残留率依次为高氮(74.044%)、中氮(71.967%)、对照(68.156%)、低氮(61.933%),且差异显著(图 1),表明高氮和中氮处理可能抑制天山云杉细根的分解,相反低氮促进其分解。

2.2 氮沉降对天山云杉细根月分解率的影响

从天山云杉细根月分解速率(图2)看,在试验

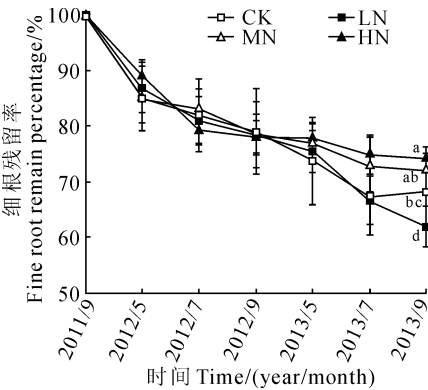


图 1 4 种氮处理下天山云杉细根残留率随时间变化  
CK, 不施氮(对照);LN, 低氮;MN, 中氮;HN, 高氮;下同;  
不同小写字母表示不同处理之间差异显著( $P<0.05$ )  
Fig.1 Remaining percentage of *P. schrenkiana* var. *tianshanica* fine root decomposition with time under four nitrogen treatments  
CK, Non-addition nitrogen(control); LN, Low nitrogen; MN, Mid nitrogen; HN, High nitrogen; The same as below;  
Different letters denote significant difference between treatments at 0.05 level

前期 4 种处理下规律不明显;而在试验后期(2013 年 7 月~2013 年 9 月)呈现为对照>中氮>低氮>高氮,表明随着时间的延长,氮沉降对分解起到了抑制作用,尤其是高氮处理。从分解时间上来看,对照总体表现随着时间的延长,分解率呈先下降后上升的趋势,分解试验后期的分解率高于前期;其余 3 种氮处理下呈现完全相反的趋势,即先增加后降低的趋势,分解试验前期的分解率高于后期。分解后期高氮和中氮处理抑制细根分解的主要原因可能是由于在施氮后,细根中氮素出现了不断累积,致使细根中氮浓度超过了细根分解所需要的水平,达到了饱和,此时氮素通过减少微生物多样性而改变微生物群落的结构,从真菌转向以细菌为主,降低了凋落物的分解速率凋落物分解速率与 N 浓度为正相关。

2.3 4 种氮处理下天山云杉细根分解系数比较

4 种氮处理下天山云杉细根分解系数在 0.151~0.218(表 2),具体表现为低氮>对照>中氮>高氮,方差分析表明施氮显著影响天山云杉细根分解系数。多重比较结果显示低氮处理的分解系数明显

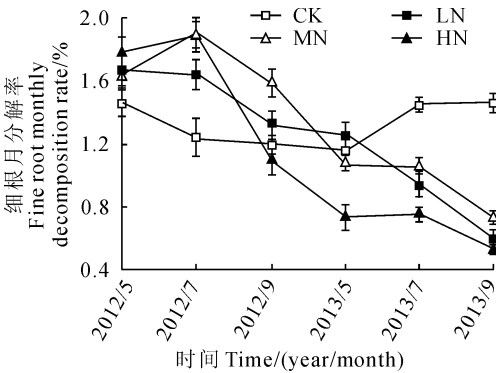


图 2 4 种氮处理下天山云杉细根月分解率比较(平均值±标准误)

Fig. 2 Comparison of *P. schrenkiana* var. *tianshanica* fine root monthly decomposition rate under four nitrogen treatments(mean±SE)

表 2 4 种氮处理下天山云杉细根残留率随时间的指数回归方程

Table 2 *P. schrenkiana* var. *tianshanica* fine root decomposition remains in different times and its equations under four nitrogen treatments

处理 Treatment	拟合参数 Fitting parameter	分解系数 Decomposition coefficient	决定系数 $R^2$	分解 50%时间 Decomposition time for 50%/year	分解 95%时间 Decomposition time for 95%/year
对照 CK	97.53	$0.192 \pm 0.020b$	0.955	3.67	15.93
低氮 LN	83.71	$0.218 \pm 0.035a$	0.931	3.31	14.39
中氮 MN	101.37	$0.162 \pm 0.008b$	0.930	4.28	18.58
高氮 HN	94.29	$0.151 \pm 0.012b$	0.898	4.64	20.17

注:同列小写字母表示不同处理间 0.05 水平显著性差异。  
Note: The different letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

高于其他 3 种处理;而对照、中氮和高氮 3 个处理间分解系数差异不显著。4 种氮处理下天山云杉细根分解 50%需要的时间依次为低氮(3.31 年)<对照(3.67 年)<中氮(4.28 年)<高氮(4.64 年),分解 95%需要的时间依次为 14.39 年、15.93 年、18.58 年和 20.17 年。从模型计算结果来看,4 种氮处理下细根分解半衰期与图 1 试验结果基本相同。

2.4 氮沉降对天山云杉细根分解过程中养分释放的影响

图 3 显示,4 种氮处理下天山云杉细根中 C 元

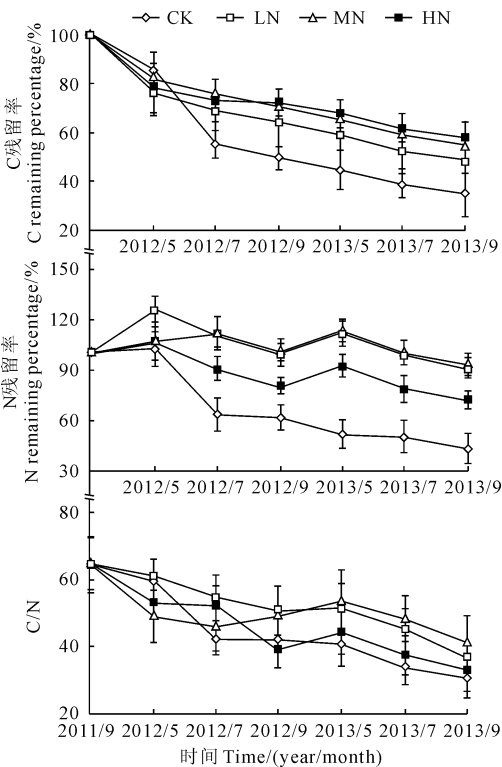


图 3 4 种氮处理下天山云杉细根分解过程中养分残留率比较(平均值±标准误)

Fig. 3 Comparison of nutrient remaining percentage in *P. schrenkiana* var. *tianshanica* fine root decomposition under four nitrogen treatments(mean±SE)

素迁移模式总体表现为直接释放,残留率均呈现逐步下降的趋势,说明施氮并没有改变 C 元素的迁移模式。分解 1 年后,高氮、中氮、低氮和对照中细根 C 元素残留率分别降至 84.91%、75.76%、81.89% 和 77.99%;分解 2 年后分别降至 57.64%、54.62%、48.49% 和 34.77%。与 C 元素迁移模式不同,4 个氮处理细根中 N 元素迁移模式表现为富集-释放模式,残留率呈波动式下降趋势。2012 年 5 月和 2013 年 5 月施氮后细根样品中 N 元素残留率都出现富

集现象。中氮和低氮处理细根 N 残留率在 2012 年 5 月达到最高值,之后开始降低,到 2013 年 5 月又呈现小幅增加趋势,之后又不断降低。高氮处理则是在 2011 年 9 月~2012 年 7 月 N 元素残留率不断增加,之后开始释放,到 2013 年 5 月达到峰值,从 2013 年 5 月~9 月不断降低。分解 2 年后,高氮、中氮、低氮和对照下天山云杉细根中 N 元素残留率分别降至 43.41%、72.34%、91.23% 和 93.40%。

图 3 显示,细根 C/N 比值总体也呈逐步下降的

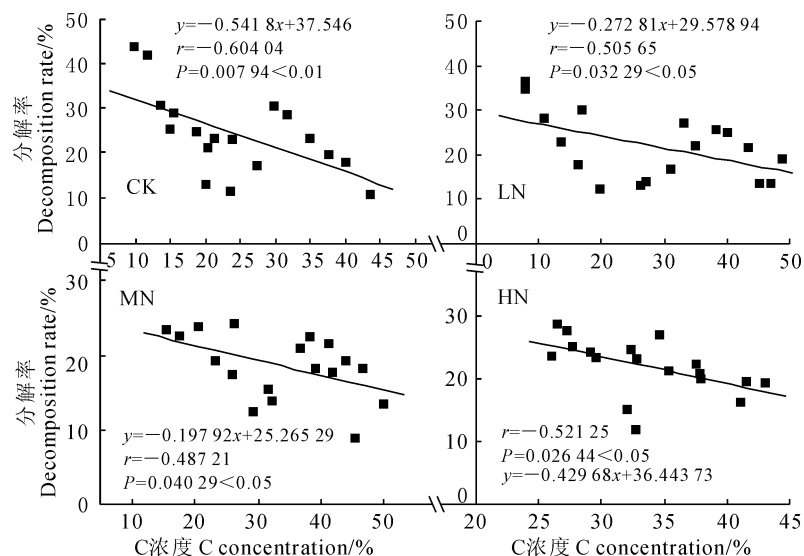


图 4 4 种氮处理下天山云杉根系 C 浓度与分解率的关系

Fig. 4 Relationships between C concentration and *P. schrenkiana* var. *tianshanica* fine root decomposition rate under four nitrogen treatments

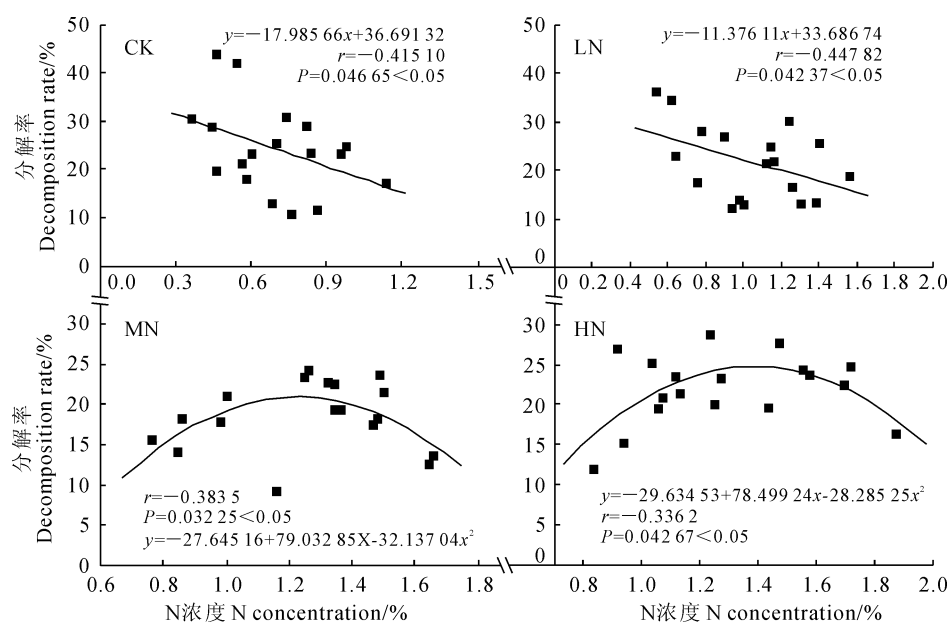


图 5 4 种氮处理下天山云杉根系 N 浓度与分解率的关系

Fig. 5 Relationships between N concentration and *P. schrenkiana* var. *tianshanica* fine root decomposition rate under four nitrogen treatments

趋势。2011年9月~2012年5月细根C/N比值总体表现为中氮>对照>低氮>高氮;2012年5月~2013年9月基本呈现高氮>中氮>低氮>对照。这与天山云杉细根干重残留率的变化趋势一致。

由图4和图5可知,在4种氮处理下天山云杉细根分解率与C元素浓度间均为线性负相关(图4);对照和低氮处理下,天山云杉细根分解率与N元素浓度间均为线性负相关,中氮和高氮处理下,细根分解率随着N元素浓度的增加呈现先增加后降低的趋势(图5)。这主要是由于随着施氮时间的延长,细根中氮素不断累积,达到了饱和,此时氮素使得微生物群落结构从真菌转向以细菌为主,降低了凋落物的分解速率<sup>[22]</sup>。

### 3 讨 论

Knorr等<sup>[23]</sup>研究发现在背景氮沉降 $<5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时施氮或氮沉降试验中,氮处理促进了凋落叶分解。本试验开展2年后发现不同浓度氮处理对天山云杉细根分解的影响不同,细根残留率顺序为高氮>中氮>对照>低氮,分解系数表现出相反的趋势。以上结果表明高氮和中氮处理可能抑制了天山云杉细根的分解速率,相反,低氮处理则促进了其分解,尤其是在分解后期。分解后期高氮和中氮处理抑制细根分解的主要原因可能是由于在施氮后,细根中氮素出现了不断累积,致使细根中氮浓度超过了细根分解所需要的水平,达到了饱和,此时氮素会减少微生物多样性而改变微生物群落的结构,从真菌转向以细菌为主,降低了凋落物的分解速率<sup>[22]</sup>。而低氮处理中,施氮后细根中富集的氮素仍保持在较低的水平,没有达到饱和,此时凋落物分解速率与N浓度为正相关。也有学者在川西开展常绿阔叶林凋落物分解对氮沉降的响应研究中得出的结论也表明:氮沉降越强烈,对凋落物分解的抑制作用越强,尤其在分解后期。常雅军<sup>[22]</sup>、涂利华等<sup>[24]</sup>、Brzgazza等<sup>[25]</sup>也得出了类似的结论。这与本文的研究结果基本一致。然而,也有学者研究结果表明氮沉降在凋落物的分解中起明显促进作用,如李考

学<sup>[26]</sup>在长白山通过研究氮沉降对2种主要针叶树种凋落物分解的影响以及Kuperman<sup>[27]</sup>在美国对长期处于不同氮沉降梯度下的*Quercus alba*叶片凋落物分解试验研究都表明,随着氮沉降的增加,凋落物分解加快。外加氮对凋落物分解无影响也是目前研究中得出的普遍结论,这可能是由于凋落物或其所处环境本身不缺N或者是由于凋落物C源质量太差以至于分解者不能对外加N作用反应。如Liao等<sup>[28]</sup>对杉木针叶凋落物分解的研究表明N的可利用性加大未必一定促进其分解。莫江明等<sup>[29]</sup>在鼎湖山研究凋落物分解对氮沉降的响应时发现,6个月的氮沉降对荷木叶片凋落物无显著影响,而同样处理却促进了马尾松针叶凋落物的分解。造成上述不同结论的原因可能与外源氮的形态、分解物中基质含量、森林类型等有关<sup>[30]</sup>。

细根元素含量的变化对N沉降的响应因树种的不同、分解阶段的不同和外加氮水平的不同而异。本研究中各处理凋落物分解过程中N元素的迁移模式为富集-释放,C元素都为直接释放,说明细根中营养元素的迁移模式并没有因为外源氮的输入而打破。但是外源氮的输入对C、N含量变化的幅度在不同氮水平下产生了不同程度的影响,表现为施氮处理的细根中C、N含量基本都高于对照。这与涂利华等<sup>[31]</sup>的研究结论基本一致。这可能是因为外源N与木质素分解过程中产生的中间产物(如多酚等)发生反应并被固定至凋落物中,进一步致使凋落物中抗分解物质增加,并导致更多的C、N累积于凋落物层。类似的现象在美国哈佛森林长期N沉降试验中也有发现<sup>[32]</sup>。天山云杉细根分解过程中,C元素残留率与分解率的趋势并不完全一致,这可能是与干物质分解对氮沉降的响应相比,C元素对氮沉降的响应有一定的滞后性。干重残留率随时间的变化趋势与C量、N量、C/N在分解过程中的变化趋势有着较显著的相关关系<sup>[33]</sup>。4种氮处理下,天山云杉细根分解率均与C含量为负相关,与N含量的关系并不一致。这主要与N元素在细根分解中迁移模式有关<sup>[22]</sup>。

### 参考文献:

- [1] ZHANG L, JACOB D J, KNIPPING E M, et al. Nitrogen deposition to the United States: distribution, sources, and processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2012, 12(10): 241–282.
- [2] NADELHOFFER K J, EMMETT B A, GTMDERSEN P. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests[J]. *Nature*, 1999, 398: 145–148.
- [3] XIAO H L (肖辉林). Atmospheric nitrogen deposition and nitrogen dynamics of forest ecosystems[J]. *Acta Ecology Sinica* (生态学报), 1996, 16(1): 91–96 (in Chinese).

- [4] LIU X J, DUAN L, MO J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2 251—2 264.
- [5] ZHANG Y L, ZHENG L X, LIU X J. Evidence for organic N deposition and its anthropogenic sources in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(5): 1 035—1 041.
- [6] ZHOU X B(周晓兵), ZHANG Y M(张元明). Review on the ecological effects of N deposition in arid and semi-arid areas[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2009, **29**(7): 3 835—3 845(in Chinese).
- [7] SU J SH(苏纪帅), CHENG J M(程积民), GAO Y(高 阳), *et al.* Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2013, **24**(3): 626—632(in Chinese).
- [8] WEI Y Y(魏圆圆), WU ZH CH(武志超), YANG W Q(杨万勤), *et al.* Fine root decomposition dynamics during freeze-thaw season in the Subalpine/Alpine forests[J]. *Scientia Silvae Sinicae*(林业科学), 2013, **49**(8): 21—28(in Chinese).
- [9] LIN CH F(林成芳), GUO J F(郭剑芬), CHEN G SH(陈光水), *et al.* Research progress in fine root decomposition in forest ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2008, **27**(6): 1 029—1 036(in Chinese).
- [10] WANG R L(王瑞丽), CHENG R M(程瑞梅), *et al.* Fine root production and turnover in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir area of China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2012, **23**(9): 2 346—2 352(in Chinese).
- [11] LIU G ZH(刘冠志), LIU G H(刘果厚), HE X(贺 晓), *et al.* Anatomical characteristics of roots with different orders and fine root of *Salix gordejewii*[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2014, **34**(5): 932—937(in Chinese).
- [12] ZHANG N(张 楠), YANG X Q(杨雪芹), CAO D CH(曹德昌), *et al.* Soil water and fertilizer factors in the trade-off of growth and lignification of *Populus euphratica* seedling[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(4): 771—779(in Chinese).
- [13] WANG H T(王会提), ZENG F J(曾凡江), *et al.* Effects of irrigation on root growth and distribution of the seedling of *Tamarix ramosissima* in oasis-desert ecotone[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(12): 2 521—2 528(in Chinese).
- [14] CHNE X(陈 曦), ZHANG N L(张乃莉), ZHOU X M(周晓梅), *et al.* The research progress of fine roots decomposition and its problems[J]. *Journal of Jilin Normal University*(Nat. Sci. Edi.) (吉林师范大学学报·自然科学版), 2012, (2): 36—40(in Chinese).
- [15] SANG W G(桑卫国), WANG Y X(王云霞), SU H X(苏宏新), *et al.* Tree ring-width response of *Picea schrenkiana* to climate change[J]. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), 2007, **52**(19): 2 292—2 298(in Chinese).
- [16] WANG Y(王 燕), ZHANG SH D(赵士洞). Biomass and net productivity of *Picea schrenkiana* var *tianshanica* forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 1999, **10**(4): 6—8(in Chinese).
- [17] WANG Y(王 燕), ZHANG SH D(赵士洞). Productivity pattern of *Picea schrenkiana* var *tianshanica* forest[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2000, **24**(2): 186—190(in Chinese).
- [18] ZHANG Y T(张毓涛), HU SH SH(胡莎莎), LI J M(李吉玫). Characteristic of root biomass of three main forest types in Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*(干旱区地理), 2013, **36**(2): 269—276(in Chinese).
- [19] ZHANG Y T(张毓涛), LI J M(李吉玫), CHANG SH L(常顺利), *et al.* Spatial distribution pattern of the *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* and its relationship with topographical factors in the middle part of Tianshan Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2011, **22**(11): 2 799—2 806(in Chinese).
- [20] YUE P(岳 平), SONG W(宋 韦), LI K H(李凯辉), *et al.* Inorganic N deposition in bayinbuluke alpin grassland of the central tianshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2014, **25**(6): 1 592—1 598(in Chinese).
- [21] WANG SH J(王圣杰), ZHANG M J(张明军), WANG F T(王飞腾), *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in the glacier regions of Northwest China: a case study of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2012, **32**(3): 777—785(in Chinese).
- [22] 常雅军. 秦岭西部针叶林凋落叶分解及其对模拟氮沉降的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [23] KNORR M, FREY S D, CURTIS P S. Nitrogen additions and litter decomposition: a meta-analysis[J]. *Ecology*, 2005, **86**(10): 3 252—3 257.
- [24] TU L H(涂利华), HU T X(胡庭兴), ZHANG J(张 健), *et al.* Effect of simulated nitrogen deposition on nutrient release in decomposition of several litter fractions of two bamboo species[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2011, **31**(6): 1 547—1 557(in Chinese).
- [25] BRAGAZZA L, BUTTLER A, HABERMACHER J, *et al.* High nitrogen deposition alters the decomposition of bog plant litter and reduces carbon accumulation[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**: 1 163—1 172.
- [26] LI K X(李考学). Effects of nitrogen deposition on litter decomposition of two main coniferous tree species in Changbai Mountain[J]. *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报), 2007, **35**(2): 17—19(in Chinese).
- [27] KUPERMAN R G. Litter decomposition and nutrient dynamics in oak-hickory forests along a historic gradient of nitrogen and sulfur deposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**(2): 237—244.
- [28] LIAO L P, GAO H, WANG S. The effect of nitrogen addition of Chinese fir leaf litter[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**: 34—39.
- [29] MO J M(莫江明), XUE J H(薛景花), FANG Y T(方运霆), *et al.* Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2004, **24**(7): 1 413—1 420(in Chinese).
- [30] FANG H(方 华), MO J M(莫江明). Effects of nitrogen deposition on forest litter decomposition[J]. *Acta Ecology Sinica*(生态学报), 2006, **29**(9): 3 217—3 136(in Chinese).
- [31] TU L H(涂利华), HU H L(胡红玲), HU T X(胡庭兴), *et al.* Response of *Betula luminifera* leaf litter decomposition to simulated nitrogen deposition in the Rainy Area of West China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*(植物生态学报), 2012, **36**(2): 99—108(in Chinese).
- [32] MELILLO J M, ABER J D, M J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics[J]. *Ecology*, 1982, **63**(1): 621—626.
- [33] HE F(何 帆), WANG D X(王得祥), LEI R D(雷瑞德). Decomposition rate of four dominant tree species leaf litters in Qingling Huoditang forests[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2011, **30**(3): 521—526(in Chinese).

(编辑: 潘新社)