

DOI: 10.5846/stxb201808051667

郝龙飞, 王庆成, 刘婷岩. 东北地区 4 种林分土壤呼吸及温、湿度敏感性对氮添加的短期响应. 生态学报, 2020, 40(2): 560-567.

Hao L F, Wang Q C, Liu T Y. Short-term responses of soil respiration, temperature and humidity sensitivity to nitrogen addition in four forests of Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 560-567.

东北地区 4 种林分土壤呼吸及温、湿度敏感性对氮添加的短期响应

郝龙飞^{1, 2}, 王庆成^{2, *}, 刘婷岩¹

1 内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019

2 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘要: 全球变化中氮沉降日益严重, 已对森林生态系统的各个过程产生了重要影响。因此, 通过研究氮添加对森林生态系统土壤碳输出的影响, 对分析全球变化背景下土壤碳吸存具有重要意义。对黑龙江省帽儿山实验林场白桦 (*Betula platyphylla*) 次生林, 以及水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、长白落叶松 (*Larix olgensis*) 人工林通过 2 年氮添加 (对照 (0 kg N hm⁻² a⁻¹), 低氮 (50 kg N hm⁻² a⁻¹), 中氮 (100 kg N hm⁻² a⁻¹) 和高氮 (150 kg N hm⁻² a⁻¹) 试验, 测定根生物量密度、土壤微生物量碳浓度、土壤呼吸速率及温、湿度敏感性等指标, 旨在探讨森林生态系统土壤呼吸对氮添加的短期响应。结果表明: (1) 低氮处理对白桦和水曲柳林土壤呼吸速率影响不显著, 但显著提高了红松和长白落叶松林土壤呼吸速率; 水曲柳林分中高氮处理土壤呼吸速率显著降低于低氮和中氮处理, 而其他林分高氮处理土壤呼吸速率仅显著低于低氮处理。(2) 氮添加处理下, 4 种林分中林分土壤呼吸速率与根生物量密度呈极显著正相关, Pearson 相关系数为 0.81。(3) 低氮处理下 5 cm 和 10 cm 处土壤呼吸温度敏感性系数 Q_{10} 值较 CK 处理分别提高了 2.65% 和 3.12%, 高氮处理较 CK 处理分别降低了 6.29% 和 5.46%。但氮添加处理对土壤呼吸和土壤湿度间的相关性无影响。综上所述, 阔叶林与针叶林土壤呼吸速率对氮添加的响应存在差异。根生物量密度是影响不同林分土壤呼吸对短期氮添加响应的主要因素, 同时氮添加处理显著改变了土壤温度敏感性系数。

关键词: 阔叶林; 针叶林; 土壤呼吸; 温度敏感性系数 (Q_{10}); 湿度相关性

Short-term responses of soil respiration, temperature and humidity sensitivity to nitrogen addition in four forests of Northeast China

HAO Longfei^{1, 2}, WANG Qingcheng^{2, *}, LIU Tingyan¹

1 College of Forestry, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019, China

2 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Nitrogen (N) deposition has been increasingly severe in global change, which had an important impact on various processes of forest ecosystems. Evaluating the effects of N addition on the output of soil carbon (C) in forest ecosystems was important for estimating the soil C sequestration to global change. A two-year N addition experiment was conducted with four different N addition levels, including the control (CK, 0 kg N hm⁻² a⁻¹), low N addition (LN, 50 kg N hm⁻² a⁻¹), medium N addition (MN, 100 kg N hm⁻² a⁻¹) and high N addition (HN, 150 kg N hm⁻² a⁻¹) levels, in four forests with different tree species compositions (*i.e.*, *Betula platyphylla*, *Fraxinus mandshurica*, *Pinus koraiensis*, and *Larix olgensis*) in Maoershan Experimental Station of Heilongjiang Province. Root biomass density, soil microbial biomass C concentration, soil respiration rate, temperature and humidity sensitivity were measured to evaluate the responses of the soil

基金项目: 内蒙古农业大学高层次人才引进科研项目 (NDYB2016-18); 第 64 批面上资助西部地区博士后人才资助计划项目 (43XB3778XB); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY18053); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0601103)

收稿日期: 2018-08-05; **网络出版日期:** 2019-11-04

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

respiration to N addition. (1) The soil respiration rate in *P. koraiensis* and *L. olgensis* stands increased significantly under LN treatment, while that were not affected in *B. platyphylla* and *F. mandshurica* stands. Compared with LN and MN treatments, the soil respiration rate under HN treatment were decreased significantly in *F. mandshurica* stand. The soil respiration rate under HN treatment was significantly lower than that of LN treatment in other stands. (2) The soil respiration rate was significantly positive correlation with root biomass density under N addition treatments. The Pearson's correlation coefficient was 0.81. (3) Compared with the CK treatment, the soil temperature sensitivity coefficients (Q10) in the depth of 5 cm and 10 cm were increased by 2.65% and 3.12% under LN treatment, but that were decreased by 6.29% and 5.46% under HN treatment, respectively. But the soil respiration was not significantly correlated with the soil humidity after N addition. Thus the responses of the soil respiration of broad-leaved and coniferous forests were different after N addition. The root biomass density was the main factor affecting the responses of the soil respiration in different forests after short-term N addition. The soil temperature sensitivity coefficient was changed significantly by N addition treatments.

Key Words: broad-leaved forests; coniferous forests; soil respiration; temperature sensitivity coefficient (Q10); humidity correlation

氮是森林生态系统养分循环中最为复杂的元素之一,对森林生态系统具有重要意义^[1]。氮沉降向森林生态系统中输入了大量的活性氮,已对森林生态系统各个过程产生了巨大的影响^[2],预计到 2050 年其影响程度将继续增加 50%—100%^[3]。当前氮沉降已成为国际上生态和环境领域的研究热点之一,且我国也已成为仅次于欧洲和美国的第三大氮沉降区^[4],根据 2014 年出版的关于氮沉降的研究专著中监测数据显示:我国高氮沉降区集中在经济发达地区,氮沉降量范围为 25.01—59.97 kg N hm⁻² a⁻¹;西北地区氮沉降量范围为 1.72—10.00 kg N hm⁻² a⁻¹;东北地区氮沉降量变化范围为 5.01—25.00 kg N hm⁻² a⁻¹^[5]。因此,我国氮沉降现象已非常严重,但目前关于氮沉降对森林生态系统影响研究结果仍存在较大的分歧^[6]。

森林土壤是森林生态系统中最大的碳库,在全球碳循环过程中起着重要的作用^[7]。当前全球碳循环研究中一个关键的科学问题是碳汇的分布及驱动机制,以往研究发现,氮沉降下土壤碳储量的演变方向存在分歧,包括增加、降低或不变等 3 种结论^[8]。大气氮沉降输入提高了生态系统中氮素有效性,直接影响林木根系生长及土壤微生物群落数量和组成,进而影响土壤碳循环^[9]。土壤碳储量的变化主要取决于土壤碳输入和输出两个过程间的平衡,而土壤呼吸是土壤碳输出的主要过程之一^[10-11]。研究表明,氮沉降通过改变土壤性状,直接或间接影响自养呼吸^[12]和异养呼吸^[13],进而影响林分土壤呼吸。由于土壤呼吸的影响因素较多,土壤呼吸的研究较为复杂,氮沉降对土壤呼吸影响的研究结果存在分歧。以往研究表明亚热带和热带森林生态系统中氮添加导致土壤呼吸平均降低了 3.4%,而在温带森林中氮添加对土壤呼吸则无显著影响^[11]。分析其原因,可能与林分土壤初始氮含量相关,大多数热带和亚热带森林为氮丰富的生态系统,额外氮输入使土壤氮饱和,最终导致生态系统植被地下根系分配减少,降低自养呼吸^[14],同时氮沉降下其森林生态系统中土壤酸化也可能导致微生物受抑制,降低异养呼吸^[15]。研究表明,我国温带森林土壤呼吸对氮沉降呈非线性响应,低氮促进而高氮抑制^[11]。然而,不同林分对环境的适应能力也存在差异,导致林地氮丰富或贫瘠的阈值界定较为困难。以往研究不同森林生态系统处于不同气候区^[16-17],无法准确评估不同林分土壤呼吸对氮沉降的响应差异^[10]。

本研究通过对黑龙江省东北林业大学帽儿山实验林场的白桦(*Betula platyphylla*)次生林,以及水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、红松(*Pinus koraiensis*)、长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林进行 2 年不同水平的氮添加试验,通过分析同一地区不同林分类型土壤呼吸及其温、湿度敏感性对氮添加的响应差异,旨在探讨不同林分碳输出过程对氮添加的响应差异,最终为森林生态系统保护提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究地区概况

研究地点位于黑龙江省东北林业大学帽儿山实验林场尖砬沟森林培育实验站(127°30′—127°34′ E, 45°21′—45°25′ N), 海拔高度 500 m 左右, 坡度为 10°—15°, 属寒温带大陆性季风气候区。该地区年均气温 2.8 °C, 1 月平均温度 -19.6 °C, 7 月平均温度 20.9 °C。年平均降水量 723 mm, 年平均蒸发量 1094 mm。无霜期 120—140 d, ≥ 10 °C 的积温 2526 °C^[18-19]。

该地区植被属于长白山植物区系。地带性植被为阔叶红松林, 现存森林多为原始植被经过反复破坏后形成的人工林和天然次生林^[20]。本研究供试林分为 27 年生水曲柳、红松和长白落叶松人工林(1986 年造林, 株行距 1.5 m×2.0 m)以及相同林龄的白桦次生林。2013 年调查结果, 白桦、水曲柳、红松、长白落叶松林平均胸径分别为 12.8 cm、8.9 cm、9.2 cm、15.7 cm; 各林分平均树高分别为 15.7 m、13.4 m、9.3 m、19.1 m。该地区地带性土壤为暗棕壤, 白桦、水曲柳、红松、长白落叶松林土壤平均厚度 40—60 cm^[18], 2012 年通过预实验测得该地区年湿沉降量为 21.5 kg N hm⁻² a⁻¹, 且 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 比值接近 1。各林分土壤基本理化性质见表 1。

表 1 东北地区 4 种林分 0—20 cm 土壤基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of the soil (0—20 cm depth) in the four forests in Northeast China

林分 Forest stands	土壤全碳浓度 Soil total C content/ (g/kg)	土壤全氮浓度 Soil total N content/ (g/kg)	土壤 pH 值 Soil pH	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)
白桦 <i>B. platyphylla</i>	32.91 (2.11)	3.20 (0.15)	5.63 (0.01)	0.66 (0.04)
水曲柳 <i>F. mandshurica</i>	72.36 (2.57)	6.61 (0.64)	5.93 (0.09)	0.39 (0.05)
红松 <i>P. koraiensis</i>	73.26 (2.39)	6.38 (0.13)	5.55 (0.12)	0.44 (0.03)
长白落叶松 <i>L. olgensis</i>	53.86 (1.65)	5.24 (0.03)	5.57 (0.11)	0.70 (0.03)

表中数据为平均值(标准误)

1.2 试验样地设置

2013 年 5 月分别在白桦次生林和水曲柳、红松、长白落叶松人工林林分中设置样地, 每个林型内设置 3 块样地(20 m×30 m), 每块样地间距离 10 m 以上。在林分样地内沿对角线方向设置 4 个 5 m×5 m 小样方进行模拟氮添加试验(各小样方之间距离 5 m), 共 4 个处理, 模拟氮添加梯度参照国内外氮沉降水平^[21-23]以及该地区 2012 年预实验测得的年湿沉降氮量进行设定, 采用 NH₄NO₃ 作为供氮肥料。4 个氮添加处理分别为: 对照(CK, 0 kg N hm⁻² a⁻¹)、低氮(LN, 50 kg N hm⁻² a⁻¹)、中氮(MN, 100 kg N hm⁻² a⁻¹)和高氮(HN, 150 kg N hm⁻² a⁻¹)。模拟氮添加过程采用多次均匀喷洒方式进行, 多次喷洒使氮输入更接近于大气氮沉降过程, 喷洒既可以模拟降雨过程将氮带入土壤, 同时也更为均匀。2013—2014 年连续两年, 从 6—10 月, 将每个处理的年施氮量均分为 5 份, 每月初施肥 1 次。具体操作方法是, 将氮肥溶于 2 L 水中, 使用喷雾器在对应样地内均匀喷洒, 对照喷洒清水。喷洒操作相当于每年增加 4 mm 的降雨, 对于该地区降雨量来讲, 可以忽略其水分增加对林分产生的影响。所有土壤取样以及相关指标测定均在每次施肥操作之前进行。

2013 年 5 月在白桦、水曲柳、红松、长白落叶松林分中各氮添加处理样地内设置 5 个土壤呼吸环, 随机设置于氮添加样地内。呼吸环采用内径为 10.2 cm, 高 10 cm 的 PVC 管, 将其一部分插入土壤, 露出地面部分约为 2 cm 左右。林分中共设定 240 个土壤呼吸环, 清除呼吸环内植被和凋落物, 测定间隔期约 30 d(根据天气情况做相应调整, 以排除天气对测定产生的影响), 每次测定需要 4 d 完成。为了减小日温度对土壤呼吸的影响, 需要在尽可能短的时间内完成成组样地(氮添加处理和对照)的测定。

1.3 根生物量密度测定

2014 年 8 月在各氮添加样地内随机选取 6 个点, 用内径 53 mm 的土钻取 0—20 cm 土样, 将该土样放入已编号的自封袋内。样品带回野外实验站后, 用流水冲洗、除去泥土和杂物, 根据外形、颜色和弹性区分别除

死根后,将小于 2 mm 细根放入塑料袋内,低温冷冻保存。带回实验室后将样品烘干至恒重(70 ℃),测定其生物量,然后计算氮添加处理下各林分细根生物量密度^[18]。

1.4 土壤微生物量碳测定

土壤微生物量碳测定:采用氯仿熏蒸浸提法。称取 20 g 新鲜土样放于 100 mL 烧杯中,同时将盛有 60 mL 的去乙醇氯仿溶液的小烧杯一起放入真空干燥器内,在干燥器底部加入少量温水和 1 mol/L NaOH 溶液。用真空泵抽真空使氯仿持续沸腾 2 min。关闭阀门,将干燥器放入 25℃ 的生化培养箱中培养 24 h。取出氯仿及干燥器底部的碱液,再用真空泵反复抽气,去除残留氯仿。处理后的土样转入 100 mL 三角瓶中,加入 40 mL, 0.5 mol/L 硫酸钾溶液,在 25℃ 水浴恒温振荡(200 r/min) 30 min 后过滤,同时做无氯仿熏蒸的空白试验,再用 0.45 μm 滤膜抽滤,滤液用 TOC 自动分析仪(luqi TOCII, Elementer, Germany)测定^[24]。

1.5 土壤呼吸测定

放置 PVC 呼吸环后,于 2013、2014 年 5—10 月,采用 LI—6400 土壤碳通量测量系统(6400-09)对土壤呼吸速率进行测定。土壤呼吸速率于每月月初选择晴朗天气进行测定,3—5 次循环的平均值为 1 个测定点的呼吸值。测定土壤呼吸速率同时,除去表层腐殖质,用数字瞬时温度计(11025, Delta TRAK, Inc., USA)测定土壤(5 cm、10 cm)温度,用土壤水分速测仪(TDR-300, Spectrum Technologies, Inc., USA)测定土壤(5 cm、10 cm)湿度。

各月土壤呼吸测定后,所得数据为每个测定点在不同时段的土壤呼吸速率值。土壤呼吸速率与土壤温度的单因素指数模型为 $R_s = ae^{bT}$, 式中 R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T 为土壤温度(℃), a 、 b 为系数。 Q_{10} 值计算方法为: $Q_{10} = e^{10b}$, 式中 b 是土壤呼吸与温度单因素指数曲线模型 $R_s = ae^{bT}$ 中的温度反应常数。土壤呼吸速率与土壤湿度的单因素线性模型为 $R_s = kW + c$ 式中 W 为土壤体积含水量, c 、 k 为系数^[25]。

1.6 数据分析

数据通过 Excel (Microsoft 2013, USA) 整理,采用 SPSS 18.0 (SPSS Inc., USA) 进行统计分析,采用 Sigmaplot 10.0 (SYSTAT Software Inc, USA) 作图。数据采用单因素(氮添加处理)方差分析,同时进行 Duncan 和 LSD 方差显著性检验。

2 结果与分析

2.1 氮添加处理对根生物量密度、土壤微生物量碳的影响

氮添加处理显著影响 4 种林分根生物量密度。与 CK 相比, LN 处理下白桦、长白落叶松、红松林分中根生物量密度呈增加的趋势,水曲柳林呈下降的趋势,但均未达到显著水平; MN 处理除白桦林分外,均显著降低了其他林分根生物量密度; HN 处理显著降低了所有林分根生物量密度(表 2)。不同林分土壤微生物量碳浓度随氮添加量递增均呈先增加后降低的趋势。与 CK 相比, LN 处理均显著提高了各林分土壤微生物量碳浓度; MN 处理显著提高了水曲柳和长白落叶松林土壤微生物量碳浓度,其他林分差异不显著; HN 处理仅显著提高了水曲柳林土壤微生物量碳浓度,其他林分均不显著(表 2)。

2.2 氮添加处理对土壤呼吸的影响

不同林分年平均土壤呼吸速率均随氮添加量递增呈先上升后下降的趋势。2013 年除红松林分外,氮添加处理对其他 3 种林分土壤呼吸速率无显著影响(图 1)。2014 年,与 CK 相比, LN 处理显著提高针叶林(红松和长白落叶松)土壤呼吸速率; MN 处理与 CK 相比,长白落叶松林土壤呼吸速率显著降低;各林分 HN 处理土壤呼吸速率均显著低于 LN 处理。白桦林土壤呼吸速率 HN 处理较 LN 处理显著降低了 20.63% ($P < 0.05$); 水曲柳林土壤呼吸速率 HN 处理较 LN 和 MM 处理分别降低了 31.35% ($P < 0.05$)、32.01% ($P < 0.05$); 红松林土壤呼吸速率 CK、MN 和 HN 处理较 LN 处理分别降低了 11.39% ($P < 0.05$)、17.08% ($P < 0.05$)、19.93% ($P < 0.05$); 长白落叶松林土壤呼吸速率 LN 处理较 CK 增加了 9.53% ($P < 0.05$), MN 和 HN 处理较 CK 分别降低了 12.54% ($P < 0.05$)、18.13% ($P < 0.05$) (图 1)。

表 2 氮添加对 4 种林分根生物量密度、土壤微生物量碳浓度的影响

Table 2 Root biomass density, soil microbial biomass carbon concentration after N addition in four forest stands

林分 Forest stands	氮添加 N deposition	根生物量密度 Root biomass density/ (g/m ²)	微生物量碳浓度 Soil microbial biomass carbon concentration/(mg/kg)
白桦 <i>B. platyphylla</i>	CK	74.23 (4.69) ab	421.13 (13.51) b
	LN	81.85 (3.30) a	590.36 (33.16) a
	MN	63.15 (3.93) bc	465.95 (6.67) b
	HN	55.21 (5.60) c	481.69 (19.06) b
水曲柳 <i>F. manschurica</i>	CK	83.10 (2.28) a	612.91 (45.05) c
	LN	77.66 (1.91) ab	771.92 (17.92) b
	MN	71.21 (4.46) b	898.93 (33.34) a
	HN	65.64 (3.88) b	741.88 (5.89) b
红松 <i>P. koraiensis</i>	CK	39.15 (4.31) ab	922.24 (47.84) b
	LN	45.76 (1.93) a	1170.34 (73.61) a
	MN	35.50 (1.46) b	946.56 (26.12) b
	HN	25.87 (1.53) c	934.35 (45.26) b
长白落叶松 <i>L. olgensis</i>	CK	50.79 (3.39) a	589.71 (22.06) c
	LN	53.10 (3.67) a	757.73 (34.57) a
	MN	34.54 (3.39) b	642.12 (16.21) b
	HN	34.96 (1.81) b	621.83 (24.80) bc

表中数据为平均值(标准误)。不同字母表示同一林分不同处理间差异显著($P < 0.05$)

2.3 氮添加处理下土壤呼吸与根生物量和微生物量相关性分析

土壤呼吸与根生物量和微生物量之间的 Pearson 相关性分析发现,氮添加处理下 4 种林分中细根生物量密度与土壤呼吸速率呈极显著正相关($P < 0.01$),而微生物量碳浓度与土壤呼吸速率无显著相关性($P > 0.05$)(表 3)。

表 3 氮添加处理下土壤呼吸速率与根生物量密度和微生物量碳浓度相关性分析

Table 3 Pearson's correlation test among soil respiration rate and root biomass density, and microbial biomass C concentration after N addition

指标 Indexes	土壤呼吸速率 Soil respiration rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	指标 Indexes	土壤呼吸速率 Soil respiration rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
微生物量碳浓度 Microbial biomass C concentration/(mg/kg)	0.20	根生物量密度 Root biomass density/(g/m ²)	0.81 **

* *. 表示显著水平为 0.01

2.4 氮添加处理下土壤呼吸与土壤温度和湿度的相关性分析

氮添加处理下,4 种林分中土壤呼吸速率与土壤温度的相关性均达到显著水平($P < 0.01$)(表 4)。5 cm 处土壤呼吸 Q_{10} 值均低于 10 cm 处土壤呼吸 Q_{10} 值。5 cm、10 cm 处土壤呼吸 Q_{10} 值均在 LN 处理下最大,从高

表 4 氮添加对土壤呼吸与土壤温度敏感性系数的影响

Table 4 Relative coefficient between soil respiration rate and soil temperature in the soil depth of 5 cm and 10 after N addition

土壤深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	$R_s = ae^{bT}$		$Q_{10} = e^{10b}$
		R^2	P	
5	CK	0.766	0.000	3.02
	LN	0.818	0.000	3.10
	MN	0.725	0.000	2.93
	HN	0.827	0.000	2.83
10	CK	0.766	0.000	3.85
	LN	0.806	0.000	3.97
	MN	0.720	0.000	3.69
	HN	0.811	0.000	3.64

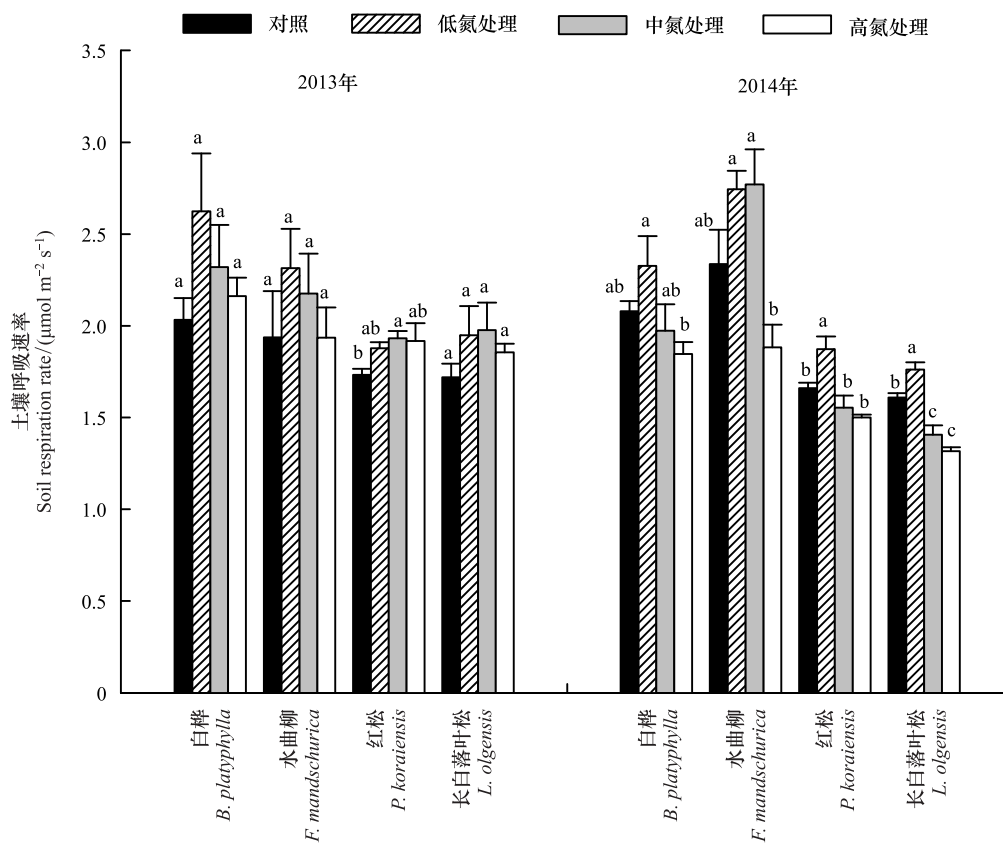


图 1 氮添加对 4 种林分 2013、2014 年平均土壤呼吸速率的影响

Fig.1 Effects of nitrogen addition on average soil respiration rate of four forest stands in 2013, 2014

Bp: 白桦(*B. platyphylla*); Fm: 水曲柳(*F. mandshurica*); Pk: 红松(*P. koraiensis*); Lo: 长白落叶松(*L. olgensis*); CK: 对照(Contrast); LN: 低氮处理(Low Nitrogen); MN: 中氮处理(medium Nitrogen); HN: 高氮处理(High Nitrogen)

到低顺序均为 LN>CK>MN>HN。5 cm 处 LN 处理下土壤呼吸 Q_{10} 值较 CK 提高了 2.65%, MN 和 HN 处理下土壤呼吸 Q_{10} 值较 CK 分别降低了 2.98%, 6.29%。10 cm 处 LN 处理下土壤呼吸 Q_{10} 值较 CK 提高了 3.12%, MN 和 HN 处理下土壤呼吸 Q_{10} 值较 CK 分别降低了 4.16%, 5.46% (表 4)。氮添加处理下, 4 种林分中土壤呼吸速率与土壤湿度的相关性均未达到显著水平 ($P>0.05$) (表 5)。

表 5 氮添加对土壤呼吸与土壤湿度间相关系数的影响

Table 5 Relative coefficient between soil respiration rate and in the soil depth of 5 cm and 10 cm after N addition

土壤深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	$R_s = kW + c$		土壤深度 Soil depth/cm	处理 Treatment	$R_s = kW + c$	
		R^2	P			R^2	P
5	CK	0.002	0.717	10	CK	0.002	0.719
	LN	0.028	0.161		LN	0.033	0.127
	MN	0.000	0.886		MN	0.001	0.834
	HN	0.025	0.183		HN	0.040	0.093

3 讨论

土壤呼吸是地下碳循环的主要指示因子^[26]。通过比较 2013、2014 年平均土壤呼吸速率变化规律发现 2013 年氮添加处理对土壤呼吸的影响较弱(图 1), 原因可能为生态系统中根系及微生物对氮添加的响应存在滞后现象, 因此, 本研究主要针对 2014 年土壤呼吸对氮添加的响应展开讨论。与 CK 相比, LN 处理显著提

高了针叶林土壤呼吸,而阔叶林无显著影响(图 1)。以往研究表明,低氮处理促进根生物量增加^[11],但不同林分根生物量对氮添加的响应存在差异(表 2);同时氮添加下针叶林较阔叶林土壤酸化程度可能更为明显,导致其异养呼吸的响应程度也存在差异^[27]。本研究发现阔叶林较针叶林根生物量密度较大(表 2),导致阔叶林分对氮添加的响应程度更为敏感,可能低于 LN 处理时森林土壤呼吸速率才会出现显著增加的作用^[28]。以往研究也发现,林分根生物量密度对异养呼吸存在强烈影响^[29],因为植物根系和微生物之间对碳源的利用存在竞争关系^[30]。根生物量密度较大林分,氮添加处理会提高根凋落物碳输入(表 2),增加微生物的可能碳源,导致氮添加对根生物量密度较大林分异养呼吸速率抑制作用减弱。4 个林分中 HN 处理下土壤呼吸速率均显著低于 LN 处理(图 1),表明高氮处理抑制土壤呼吸。原因可能是高氮处理下林分遵循生长策略规律减少根生物量分配,根呼吸降低;同时高氮处理下土壤酸化严重,抑制微生物活性明显,异养呼吸下降^[11]。综合以上结果可以得出氮添加对土壤呼吸的影响取决于根呼吸和异养呼吸二者的平衡作用。然而本研究中通过相关性分析发现氮添加下土壤呼吸速率与林分细根生物量密度呈极显著正相关($P < 0.01$),与微生物量碳浓度无显著相关关系(表 3),表明短期氮添加处理主要通过影响根系生长及分配,进而影响土壤呼吸。

在全球变化背景条件下,了解全球变化中(如气候变暖及降雨分配变化等)协同作用对土壤碳储量的影响有重要的意义^[6,31]。氮添加对土壤呼吸的温、湿度敏感性的影响可以评价温、湿度和氮添加对土壤呼吸协同效应。本研究发现,氮添加处理对土壤呼吸与湿度相关性无显著影响,表明氮添加处理和土壤湿度协同效应较弱。然而,4 种林分中 5 cm、10 cm 处土壤呼吸 Q_{10} 值均在 LN 处理下达到最大,从高到低顺序均为 LN > CK > MN > HN(表 4),表明低氮处理提高了土壤温度敏感性,高氮处理降低了土壤温度敏感性。导致以上结果的原因可能是,低氮处理对林分根生物量密度有促进作用,同时显著提高了土壤微生物量(表 2),微生物量增加可以增加土壤呼吸温度敏感性^[32]。高氮处理下土壤微生物量增量降低(表 2),而其微生物活性下降^[11],同时显著降低了土壤根生物量密度(表 2),进而导致了土壤呼吸温度敏感性降低。由此可以推测低氮添加下,随全球变暖土壤碳释放速率可能会相应增加,进而可能导致土壤碳储量下降,使大气中温室气体进一步增加,加速全球碳循环。

4 结论

白桦、水曲柳、红松和长白落叶松 4 种林分土壤呼吸速率对氮添加的响应存在差异。阔叶林(白桦和水曲柳)土壤呼吸速率较针叶林(红松和长白落叶松)更易受氮添加的影响。林分根生物量密度影响土壤呼吸对短期氮添加响应程度。

参考文献(References):

- [1] Johnson D W, Turner J. Nitrogen budgets of forest ecosystems: a review. *Forest Ecology and Management*, 2014, 318: 370-379.
- [2] Compton J E, Harrison J A, Dennis R L, Greaver T L, Hill B H, Jordan S J, Walker H, Campbell H V. Ecosystem services altered by human changes in the nitrogen cycle: a new perspective for US decision making. *Ecology Letters*, 2011, 14(8): 804-815.
- [3] Law B. Biogeochemistry: nitrogen deposition and forest carbon. *Nature*, 2013, 496(7445): 307-308.
- [4] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [5] Du E Z, Liu X J. High rates of wet nitrogen deposition in China: a synthesis//Sutton M A, Mason K E, Sheppard L J, Sverdrup H, Haeuber R, Kicks W K, eds. *Nitrogen Deposition, Critical Loads and Biodiversity*. Dordrecht: Springer, 2014: 49-56.
- [6] 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.
- [7] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298(5870): 156-159.
- [8] 程淑兰, 方华军, 徐梦, 耿静, 何舜, 于光夏, 曹子斌. 氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展. *生态学报*, 2018, 38(23): 8285-8295.
- [9] Sun T, Dong L L, Mao Z J. Simulated atmospheric nitrogen deposition alters decomposition of ephemeral roots. *Ecosystems*, 2015, 18(7):

- 1240-1252.
- [10] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, Subke J A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman A J, Grace J, Matteucci G, Papale D, Piao S L, Schulze E D, Tang J, Law B E. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 315-322.
- [11] Tian D, Du E Z, Jiang L, Ma S H, Zeng W J, Zou A L, Feng C Y, Xu L C, Xing A J, Wang W, Zheng C Y, Ji C J, Shen H H, Fang J Y. Responses of forest ecosystems to increasing N deposition in China: a critical review. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 75-86.
- [12] Li Y, Sun J, Tian D S, Wang J S, Ha D L, Qu Y X, Jing G W, Niu S L. Soil acid cations induced reduction in soil respiration under nitrogen enrichment and soil acidification. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1535-1546.
- [13] Li Y, Tian D S, Yang H, Niu S L. Size-dependent nutrient limitation of tree growth from subtropical to cold temperate forests. *Functional Ecology*, 2018, 32(1): 95-105.
- [14] 王建宇, 王庆贵, 闫国永, 姜思领, 刘博奇, 邢亚娟. 原始云冷杉、红松林树木生长对氮沉降的响应. *北京林业大学学报*, 2017, 39(4): 21-28.
- [15] Peng Y, Chen G S, Chen G T, Li S, Peng T C, Qiu X R, Luo J, Yang S S, Hu T X, Hu H L, Xu Z F, Liu L, Tang Y, Tu L H. Soil biochemical responses to nitrogen addition in a secondary evergreen broad-leaved forest ecosystem. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2783.
- [16] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A F S, Ekblad A, Höglberg M N, Nyberg G, Ottosson-Löfvenius M, Read D J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001, 411(6839): 789-792.
- [17] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂. *Nature*, 2001, 411(6836): 466-469.
- [18] 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.
- [19] 潘建平, 赵克尊. 东北林业大学帽儿山实验林场林业资源增长与生态环境建设的研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007.
- [20] 刘婷岩. 不同结构的水曲柳与落叶松人工林碳储量研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [21] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, McDowell W H, Nadelhoffer K J, Melillo J M, Steudler P. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. *Ecosystems*, 2000, 3(3): 238-253.
- [22] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [23] Bowden R D, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.
- [24] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 54-59.
- [25] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 吴世义. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668-2674.
- [26] Kutsch W L, Bahn M, Heinemeyer A. *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [27] Liu X F, Yang Z J, Lin C F, Giardina C P, Xiong D C, Lin W S, Chen S D, Xu C, Chen G S, Xie J S, Li Y Q, Yang Y S. Will nitrogen deposition mitigate warming-increased soil respiration in a young subtropical plantation? *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 78-85.
- [28] Yan G Y, Xing Y J, Wang J Y, Li Z H, Wang L G, Wang Q G, Xu L J, Zhang Z, Zhang J H, Dong X D, Shan W J, Guo L, Han S J. Sequestration of atmospheric CO₂ in boreal forest carbon pools in northeastern China: effects of nitrogen deposition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 248: 70-81.
- [29] Thakur M P, Milcu A, Manning P, Niklaus P A, Roscher C, Power S, Reich P B, Scheu S, Tilman D, Ai F X, Guo H Y, Ji R, Pierce S, Ramirez N G, Richter A N, Steinauer K, Strecker T, Vogel A, Eisenhauer N. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors. *Global Change Biology*, 2015, 21(11): 4076-4085.
- [30] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, Bessler H, Engels C, Griffiths R I, Mellado-Vázquez P G, Malik A A, Roy J, Scheu S, Steinbeiss S, Thomson B C, Trumbore S E, Gleixner G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 2015, 6: 6707.
- [31] 卫云燕, 尹华军, 刘庆, 黎云翔. 气候变暖背景下森林土壤碳循环研究进展. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(6): 888-894.
- [32] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. *生态学报*, 2011, 31(8): 2301-2311.