

模拟氮沉降对华北落叶松人工林土壤微生物碳和微生物氮的动态影响

李素新, 覃志杰, 刘泰瑞, 郭晋平

(山西农业大学林学院, 山西 太谷 030801)

摘要: 为揭示过量的大气氮沉降对华北落叶松人工林土壤微生物碳、氮和土壤呼吸的影响, 通过对照(N_0 : $0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)、轻度施氮(N_1 : $8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)、重度施氮(N_2 : $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) 3个外源施氮水平下5年的野外定点试验和观测, 模拟过量氮沉降条件下华北落叶松人工林土壤微生物碳、氮和土壤呼吸的变化, 旨在阐明林下土壤微生物和呼吸对过量氮沉降的响应及其对土壤碳氮循环的影响。结果表明: 在5—10月生长季中, 土壤微生物碳和氮的平均含量分别为 $1\,098.93, 97.31 \text{ mg}/\text{kg}$, 二者都随土层深度的增加呈下降趋势; 轻度施氮促进土壤微生物碳和氮的增加, 重度施氮抑制土壤微生物碳和氮的增加; 土壤微生物碳和微生物氮从生长初期5月起, 5—7月呈增加趋势, 7月出现峰值, 8月降低, 9—10月小幅增加, 呈现“N”形曲线。土壤微生物碳氮比为 $4.94 \sim 18.54$, 且随施氮量增加而减小。各氮处理下, 华北落叶松人工林土壤呼吸速率5、6月较低, 7—8月持续增加, 并在8月达到最高, 9—10月逐渐降低。相关分析表明, 土壤呼吸与土壤全氮、含水量、微生物碳和微生物氮含量呈极显著正相关关系, 与土壤有机质呈显著正相关关系。在全球变化背景下, 研究结果可为进一步明确过量大气氮沉降对森林生态系统碳氮循环的影响途径和机制研究提供重要参考。

关键词: 模拟氮沉降; 土壤微生物碳和氮; 土壤呼吸; 季节动态; 华北落叶松人工林

中图分类号: S714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)01-0268-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.01.039

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon and Nitrogen Dynamics of *Larix principis-rupprechtii* Plantation

LI Suxin, TAN Zhijie, LIU Tairui, GUO Jinping

(College of Forestry, Shanxi Agriculture University, Taigu, Shanxi 030801)

Abstract: To examine the effects of excessive atmospheric nitrogen deposition on soil microbial carbon and nitrogen in *Larix principis-rupprechtii* plantation, we conducted fixed experiment plots and 5 years observation experiments to simulate the changes of microbial carbon, nitrogen, and soil respiration in soil of *Larix principis-rupprechtii* plantation with three nitrogen deposition treatments: CK (N_0 : $0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), light N level (N_1 : $8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$), and severe N level (N_2 : $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) to clarify the response of soil microorganism under excessive nitrogen deposition forest and the influence on soil carbon and nitrogen cycle. The results showed that the average content of soil microbial carbon and nitrogen was $1\,098.93$ and $97.31 \text{ mg}/\text{kg}$. In the May-October growing seasons respectively they showed a downward trend with the increase of soil depth. Light N addition promoted the increase of soil microbial carbon and nitrogen. Severe N addition inhibited the increase of soil microbial carbon and nitrogen. The content of soil microbial carbon and nitrogen increased from May to July and peaked in July, then decreased in August, slightly increased from September to October, and showed an “N” curve. The C/N of soil microbial was between 4.94 and 18.54 , and decreased with the increase of N addition. The soil respiration rate of *Larix principis-rupprechtii* plantation was lower in May and June, continuously increased from July to August and reached the peak in August, then gradually decreased from September to October under different N treatments. The correlation analysis showed that soil respiration was significantly positively correlated with the content of soil total nitrogen, water content, microbial carbon and microbial nitrogen, and was positively correlated with soil organic matter. With the

收稿日期: 2019-07-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(30970480); 山西省林业科技创新项目(2018LYCX32); 山西省研究生教育创新项目(2018BY064)

第一作者: 李素新(1981—), 女, 在读博士研究生, 主要从事森林生态土壤研究。E-mail: SXL362@163.com

通信作者: 郭晋平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事森林景观生态、森林资源培育与经营管理研究。E-mail: jinpinguo@126.com

global change, the research results can provide important reference for further clarifying the impact of excessive atmospheric nitrogen deposition on carbon and nitrogen cycle in forest ecosystems.

Keywords: simulated nitrogen deposition; soil microbial carbon and nitrogen; soil respiration; seasonal dynamics; *Larix principis-rupprechtii* plantation

人类活动影响下大气中活性氮浓度的增加不断向陆地和水体生态系统沉降,导致自然界氮循环失去原有平衡^[1-2]。中国是全球三大氮沉降集中区之一,大气氮沉降量显著增加的范围约为 5.1~25.6 kg/(hm²·a),平均 12.9 kg/(hm²·a)^[3]。长期过量氮沉降影响植物的生长、生态系统功能和生物多样性^[4],导致森林衰退^[5],进而对全球变暖产生正反馈或负反馈作用^[6]。土壤微生物是土壤活有机质的重要组成部分,在陆地生态系统碳氮循环中发挥重要作用^[7]。森林土壤微生物碳氮是森林生态系统碳氮循环的重要组成部分^[8],由于其周转速度快,对外界环境变化敏感,可作为评价土壤质量的生物指示指标^[9]。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要过程,其动态变化将对全球碳平衡产生深远的影响^[10]。长期过量的大气氮沉降必然对土壤微生物和土壤呼吸带来显著影响。在对华西雨屏区苦竹林^[11]、华西雨屏区天然常绿阔叶林^[12]、太岳山油松天然林和人工林^[13]、红椎人工幼龄林^[14]、油松—辽东栎混交林^[15]等森林类型的研究报道中发现,土壤微生物碳、氮含量对氮沉降的响应表现为增加、降低或无显著影响等完全不同的模式。可见,关于大气氮沉降如何影响森林生态系统中土壤微生物量和土壤呼吸的现有研究成果尚未取得共识,进一步研究氮沉降对森林土壤微生物和土壤呼吸的影响,揭示其关键影响因素和作用机制,对森林生态系统经营具有重要意义。

本研究以华北落叶松人工林为研究对象,采用全生长季多水平外源施氮野外定点试验和观测的方法,经过持续 5 年的林地模拟氮沉降试验,通过对不同外源施氮水平下林地土壤微生物碳、氮含量的差异、垂直分布、季节动态及土壤呼吸的测定分析,阐明氮沉降增加对华北落叶松人工林土壤微生物和土壤呼吸的影响,旨在为全球变化大气氮沉降背景下研究华北

落叶松人工林适应性经营技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究试验地在山西省关帝山林区国营龙兴林场五叶沟,建立了“大气氮沉降对森林生态系统的影响研究”定位试验研究站,地理位置在吕梁山脉中段关帝山林区腹地(北纬 37°28′—37°55′,东经 111°22′—111°40′)。当地气候属温带大陆性山地气候,年均温 8.85℃,年均降水量 550 mm,降雨集中在 7—9 月,无霜期 110~140 d,生长季为 4—10 月。试验地为林龄 24 年的华北落叶松人工林纯林,土壤为山地褐土,土层厚度 60 cm,树种组成为 10 华北落叶松+白桦,郁闭度为 0.81,林分平均高 15.6 m,平均胸径 13.8 cm,林下植被种类丰富,覆盖度 85%,其中,灌木层主要有土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、金花忍冬(*Lonicera chrysantha*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、美蔷薇(*Rosa bella*)、黄瑞香(*Daphne giraldii*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)等,草本植物有小红菊(*Dendranthema chanelii*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum*)、香薷(*Elsholtzia ciliate*)、鼠掌老鹳草(*Geranium sibiricum*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、四叶葎(*Galium bungei*)、羊红膻(*Pimpinella thellungiana*)、草问荆(*Equisetum pratense*)等。

1.2 样地设置与施氮处理

试验采用 3 个处理 3 次重复,随机区组设计。在龙兴林场五叶沟的 3 个坡面的华北落叶松人工林中,分别设置 3 块固定标准地,共 9 块标准地。标准地初设于 2013 年 4 月中旬,面积 20 m×30 m,外围缓冲带≥10 m,埋设中心桩、角桩和界桩,标准地设置后立即进行立地条件调查和林分因子测定。标准地概况见表 1。

表 1 样地基本概况

样地	经纬度	坡度/ (°)	坡向	坡位	海拔/ m	树种 组成	郁闭度	平均 树高/m	林龄/ a
1	111°35′56″E, 37°29′44″N	16	东北	下坡	1710	10 华北落叶松+白桦	0.81	15.3	24
2	111°31′62″E, 37°26′45″N	18	东北	中坡	1730	10 华北落叶松+辽东栎	0.78	15.5	24
3	111°26′66″E, 37°22′49″N	15	东坡	中坡	1740	10 华北落叶松+白桦	0.79	16.0	24

试验设计的 3 个施氮处理水平的施氮量分别为:对照 N0(0 g/(m²·a))、轻度施氮 N1(8 g/(m²·a))和重度施氮 N2(15 g/(m²·a))。外源施氮处理采用化学纯(≥98.5%)NH₄NO₃ 晶体水溶液,按设计施氮

量计算用药量。

在 2013—2017 年期间,每年 4—10 月,每月月初按设计药量溶解于 20 L 水中,用背负式喷雾器均匀喷洒在标准地内,对对照地喷洒等量清水。

1.3 土壤样品采集与测定

土壤样品采集于 2017 年,以标准地为单位,于施氮 1 个月后的 5—10 月各月的月初,每次取样设 5 个 2 m×2 m 的土壤取样样方,样方内 3 个取样点,用内径 10 cm 的土钻分 3 层取样,表层(0—10 cm)、浅层(10—20 cm)和 中层(20—30 cm),5 个样方的土样分层混合,组成样地土壤样品,每次采集 27 个土样,塑料密封袋分装标记、记录后带回实验室。

带回实验室的土样分为 3 份,其中,第 1 份在 -80 °C 冰箱中保存并及时测定土壤微生物碳和氮,第 2 份用于土壤含水率测定,第 3 份经室内风干、研磨、过筛,用于理化性质指标的测定。土壤含水量测定采用烘干法,总有机碳测定用 multi N/C 2100 分析仪和 HT1300 Solids Module (Analytik Jena AG, Germany),全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法,有机质含量测定采用重铬酸钾容量法—稀释热法,土壤 pH 值测定采用土水比 1:2.5 电位法。土壤微生物碳和氮含量的测定采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法^[16],其中熏蒸处理为 25 °C 真空干燥器中培养 24 h,用 0.5 mol/L K₂SO₄ 溶液浸提,浸提液中碳氮采用德国 Multi N/C 2100 总有机碳/总氮分析仪测定,计算公式为:

$$MC = EC / 0.45, MN = EN / 0.54$$

式中:MC 和 MN 为土壤微生物量碳和土壤微生物量氮(mg/kg);EC 和 EN 为熏蒸和未熏蒸土壤样品中浸提液中碳和氮含量的差值(mg/kg);0.45 和 0.54 为校正系数。

表 2 不同施氮处理下土壤各土层主要理化性状指标

土层深度/cm	施氮处理	总氮/ (g·kg ⁻¹)	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	碳氮比	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH	含水量/ %
0—10	N0	1.67±0.11aAB	27.26±2.70aA	16.32±1.42bA	33.84±6.58aA	7.84±0.27cA	26.4±1.7aA
	N1	1.59±0.18aB	24.19±3.46aB	15.16±1.00bAB	29.72±6.67aB	7.79±0.13cA	22.2±2.6aB
	N2	1.74±0.15aA	26.65±2.39aA	15.40±1.52bAB	35.41±4.78aA	7.65±0.18cB	26.9±1.3aA
10—20	N0	1.15±0.21bB	20.28±2.15bA	17.93±2.51bA	19.23±4.43bA	8.04±0.22bA	22.3±2.3bA
	N1	1.27±0.22bA	18.74±3.18bB	14.77±0.96bC	21.89±3.43bA	7.99±0.10bA	20.3±3.2bB
	N2	1.27±0.17bA	21.28±1.32bA	16.90±1.53bAB	20.96±5.77bA	7.93±0.13bB	22.4±1.9bA
20—30	N0	0.87±0.19cB	17.61±1.98cA	20.68±3.43aA	13.57±3.61cA	8.13±0.19aA	20.5±2.6cA
	N1	0.96±0.20cAB	15.69±3.29cB	16.38±1.10aC	15.56±3.89cA	8.13±0.13aA	18.9±2.4cB
	N2	1.00±0.10cA	19.13±1.24cA	19.28±1.41aB	14.83±5.37cA	8.06±0.12aAB	19.9±1.5cB

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示同一土层不同施氮水平之间的差异($P < 0.05$);不同小写字母表示相同施氮水平不同土层之间的差异($P < 0.05$)。下同。

2.2 外源施氮对林下土壤微生物碳氮的影响

由表 3 可知,表层土壤微生物碳含量变化范围为 1 260.02~1 701.08 mg/kg;浅层土壤微生物碳含量变化范围为 964.09~1 211.04 mg/kg;中层土壤微生物碳含量变化范围为 531.02~728.87 mg/kg。表层土壤微生物碳含量比浅层和中层分别高 30.70%~40.46%和 133.39%~137.28%。在施氮处理下,土壤微生物碳含量随土层深度增大而降低,3 个土层的土壤微

1.4 土壤呼吸的测定

土壤呼吸采用 LI-8100 便携式土壤呼吸测定仪(LI-COR, Nebraska, USA)对土壤呼吸进行测定,在每块样地内随机布置 3 个内径 20 cm,高 10 cm 的 PVC 环,将 PVC 环的一端压入土中约 5 cm 深,间隔 24 h 后测定土壤呼吸^[17]。每个样点设置 3 次重复测定,每次测定时间为 3 min。

1.5 数据处理与分析

数据经 Microsoft Excel 2013 整理后,用 SPSS 20.0 统计软件进行分析,采用单因素方差分析法分析外源施氮对土壤微生物碳、氮和土壤呼吸的影响,用 LSD 法进行差异显著性检验。用 Pearson 相关系数评价土壤微生物碳、氮、土壤呼吸与理化性质的关系。用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同外源施氮水平下华北落叶松人工林土壤理化性质特征

不同外源施氮水平下华北落叶松人工林土壤各土层理化性状指标的生长季均值见表 2。土壤总氮含量、总有机碳含量、碳氮比、有机质含量、pH、含水量各指标在不同施氮水平之间均有显著差异。其中,土壤总氮含量随外源施氮量的增加而增加,土壤总有机碳含量在轻度施氮 N1 处理下较对照降低,在重度施氮 N2 处理下含量增加。土壤总氮含量、总有机碳含量、有机质含量和含水量都随土层深度增加而下降,而土壤 pH 随土层深度增加而升高。

生物碳含量随施氮量的增加呈现出不一致的变化规律。

表层土壤微生物氮含量变化范围为 127.43~148.66 mg/kg;浅层土壤微生物氮含量变化范围为 91.40~108.42 mg/kg;中层土壤微生物氮含量变化范围为 48.64~61.44 mg/kg。表层土壤的微生物氮含量比浅层和中层分别高 39.42%~37.11%和 141.96%~161.99%。在不同施氮处理下,土壤微生物氮含量随土层深度增加而降低,3 个土层的土壤微生物氮含量

随施氮量的增加呈现出不一致的变化规律。

表层土壤微生物碳氮比变化范围为 9.86~12.99;浅层土壤微生物碳氮比变化范围为 8.92~13.15;中层土壤微生物碳氮比变化范围为 10.16~15.26。3 个土层土壤微生物碳氮比都随施氮量的增加而呈下降趋势。在轻度、重度施氮处理下土壤微生物碳氮比与对照相比,均呈显著差异。

2.3 施氮处理下土壤微生物碳、氮和碳氮比的季节动态变化

2.3.1 不同施氮处理下土壤微生物碳的季节动态

由图 1 可知,不同施氮处理下各土层土壤微生物碳从生长初期 5 月开始逐步增加,7 月出现峰值,之后又降低再升高,呈现“N”形曲线。在重度施氮处理下土壤微生物碳在 3 层土壤中均比对照样地减小,对照样地各月均值的变幅为 385.09~2 359.00 mg/kg,重度施氮处理下各月均值的变幅为 376.85~1 574.03

mg/kg,比对照样地下降了 2.14%~33.28%。7 月土壤微生物碳的峰值在表层为对照>轻度>重度,其余月份表层土壤微生物碳均为轻度>对照>重度。

表 3 不同施氮处理下土壤微生物碳、氮和碳氮比含量

土层深度/cm	施氮处理	土壤微生物碳/(mg·kg ⁻¹)	土壤微生物氮/(mg·kg ⁻¹)	碳氮比
0—10	N0	1658.73±401.07a	127.69±23.81b	12.99±1.79a
	N1	1701.08±266.02a	148.66±24.13a	11.50±0.95b
	N2	1260.02±254.26b	127.43±12.03b	9.86±1.44c
10—20	N0	1211.04±372.80a	91.40±21.82b	13.15±1.63a
	N1	1126.60±296.52ab	108.42±26.45a	10.57±1.79b
	N2	964.09±286.68b	107.34±12.94a	8.92±1.85c
20—30	N0	708.94±279.51a	48.64±24.86a	15.26±2.95a
	N1	728.87±296.08a	61.44±20.95a	11.82±1.62b
	N2	531.02±213.17a	54.75±18.18a	10.16±3.17c

注:同列不同小写字母表示同一土层不同施氮水平间差异显著(P<0.05)。

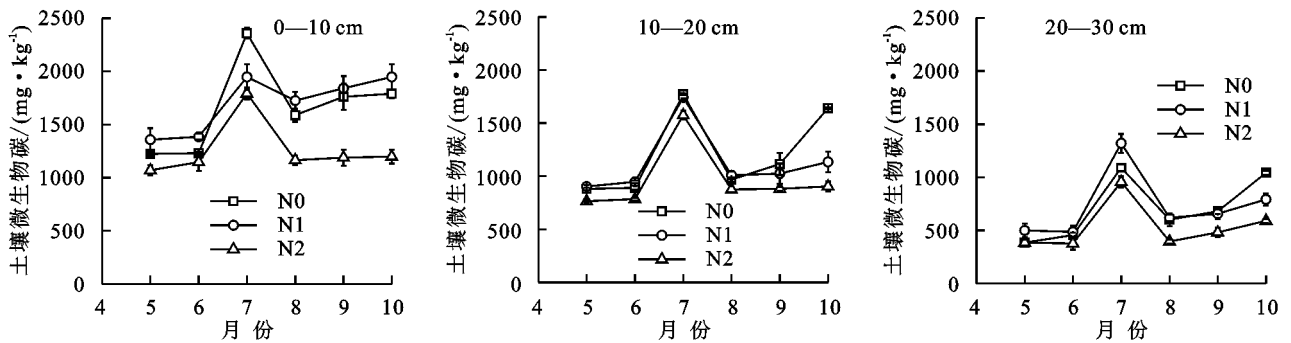


图 1 不同施氮处理下土壤微生物碳的季节动态

2.3.2 不同施氮处理下土壤微生物氮的季节动态

由图 2 可知,不同施氮处理下各土层土壤微生物氮与碳呈现出相似的变化规律,从生长初期 5 月开始逐步升高,到 7 月达最高,之后又降低再升高,呈现“N”形曲线。除 5 月外,6—10 月土壤微生物氮在表层出现一致的变化趋势,为轻度>对照>重度。在浅层和中层土壤微生物氮在不同月份不同施氮水平下呈现

出不一致的变化规律,但峰值都出现在 7 月,3 层土壤微生物氮含量表现为表层>浅层>中层。在表层对照、轻度、重度施氮处理下土壤微生物氮分别为 157.45, 167.65, 145.24 mg/kg,浅层对照、轻度、重度施氮处理下土壤微生物氮分别为 116.00, 140.16, 128.38 mg/kg,中层对照、轻度、重度施氮处理下土壤微生物氮分别为 97.38, 100.15, 80.55 mg/kg。

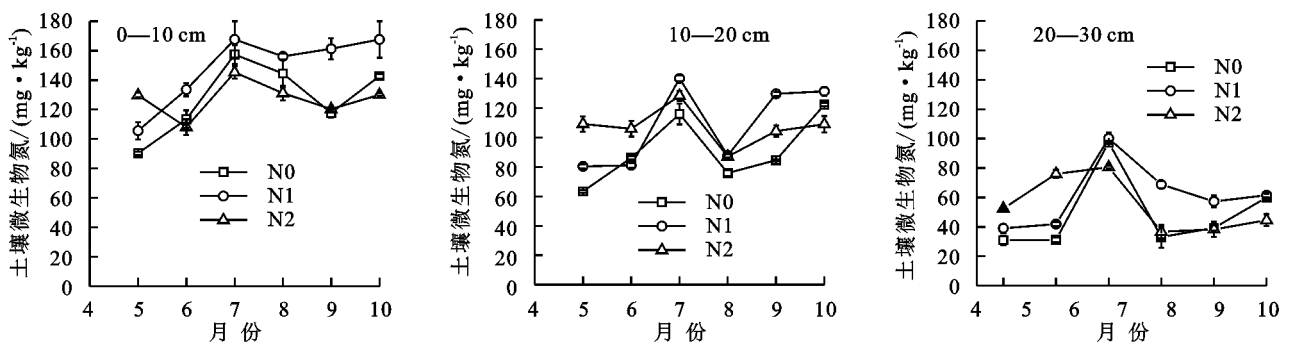


图 2 不同施氮处理下土壤微生物氮的季节动态

2.3.3 不同施氮处理下土壤微生物碳氮比的季节动态

土壤微生物碳氮比的变幅范围为 4.94~18.54, 5—6 月碳氮比值都是重度施氮处理下出现最低值。表层和浅层土壤微生物碳氮比均在 7 月出现峰值,中层土壤微生物碳氮比峰值出现在 8 月。不同土层土壤微生物

碳氮比的峰值均出现在轻度施氮处理下(图 3)。

2.4 施氮处理下土壤呼吸的季节动态变化

由 2017 年 5—10 月期间华北落叶松人工林林内土壤呼吸速率(表 4)可知,5 月和 10 月各处理间的土壤呼吸速率差异不显著(P>0.05)。9 月轻度施氮

N1 处理下土壤呼吸速率高于对照,比 N0 增加 15.50%,6—8 月轻度施氮 N1 处理下土壤呼吸速率与对照差异不显著($P>0.05$)。7 月和 8 月重度施氮 N2 处理的土壤呼吸速率低于对照,比对照 N0 分别降低了 6.55% 和 5.13% ($P<0.05$),6 月和 9 月重度施氮 N2 处理下土壤呼吸速率与对照相比差异不显

著($P>0.05$)。各氮处理没有改变土壤呼吸的季节性变化规律,各处理下土壤呼吸具有相似的季节变化规律。整体来看,各氮处理下,华北落叶松人工林土壤呼吸速率 5 月和 6 月较低,但差异不显著($P>0.05$),7—8 月持续增加,差异达到极显著($P<0.05$),并在 8 月达到最高,9—10 月土壤呼吸速率逐渐降低。

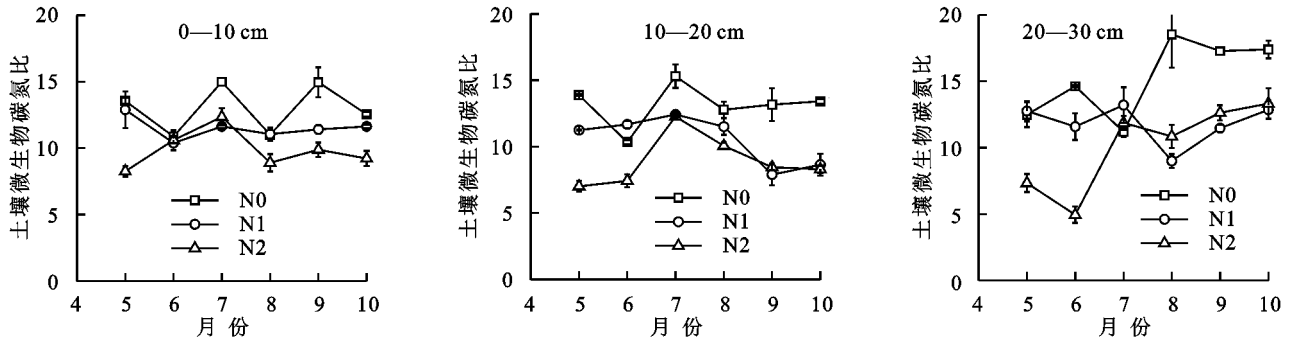


图 3 不同施氮处理下土壤微生物碳氮比的季节动态

表 4 不同施氮处理下土壤呼吸速率

单位: $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

施氮处理	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
N0	$2.80 \pm 0.16\text{aC}$	$3.07 \pm 0.27\text{abC}$	$3.51 \pm 0.35\text{aB}$	$3.90 \pm 0.08\text{aA}$	$2.58 \pm 0.10\text{bC}$	$2.66 \pm 0.20\text{aC}$
N1	$3.11 \pm 0.15\text{aC}$	$3.25 \pm 0.08\text{aC}$	$3.57 \pm 0.15\text{aB}$	$4.02 \pm 0.04\text{aA}$	$2.98 \pm 0.14\text{aE}$	$2.86 \pm 0.06\text{aD}$
N2	$2.90 \pm 0.14\text{aC}$	$2.75 \pm 0.13\text{bC}$	$3.28 \pm 0.10\text{bB}$	$3.70 \pm 0.07\text{bA}$	$2.43 \pm 0.11\text{bD}$	$2.50 \pm 0.13\text{aD}$

注: 同列不同小写字母表示每月各处理间差异显著($P<0.05$); 同行不同大写字母表示同一施氮处理下不同月份之间差异显著($P<0.05$)。

2.5 施氮处理对土壤呼吸速率的影响

由图 4 可知,N2、N1 和 N0 处理下 5—10 月土壤呼吸平均速率分别为(2.93 ± 0.467), (3.30 ± 0.414), (3.09 ± 0.522) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。与对照 N0 相比,轻度施氮 N1 处理使土壤呼吸速率有所提高,但增幅不大,增加了 6.80%,而重度施氮 N2 处理对土壤呼吸产生了抑制作用,土壤呼吸速率降低了 5.18%,各施氮处理与对照 N0 均未达到差异显著水平($P=0.071$)。

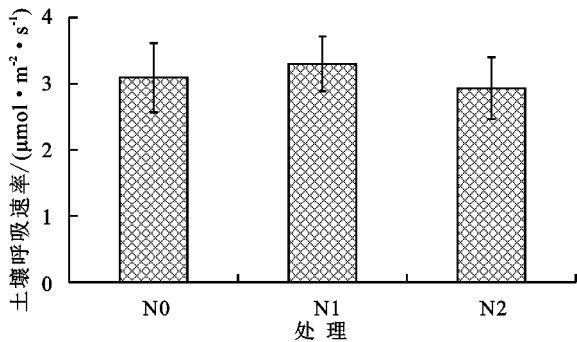


图 4 不同施氮处理下 5—10 月土壤呼吸速率

2.6 土壤养分、土壤微生物量与土壤呼吸的相关性分析

由表 5 可知,土壤微生物碳和微生物氮与土壤全氮、总有机碳、碳氮比、有机质呈极显著正相关关系;土壤 pH 与土壤全氮和有机质呈极显著负相关关系,相关系数分别为 -0.391 和 -0.336 ;土壤呼吸与全氮、含水量、微生物碳和微生物氮呈极显著正相关关系,相关系数分别为 0.364 , 0.365 , 0.308 , 0.439 , 与土

壤有机质呈显著正相关关系。

3 讨论

3.1 土壤微生物碳、氮随施氮的变化规律

氮沉降能直接或间接影响土壤微生物的生长和繁殖,随着施氮水平的变化,土壤微生物的种类、数量、种群多样性、结构及功能均会发生变化,进而对土壤中的物质转化、营养元素迁移产生影响。本研究表明,轻度施氮促进了土壤微生物碳氮的增加,而重度施氮抑制了土壤微生物碳氮的增加,这与 Deforest 等^[18] 研究中长期高氮沉降可降低土壤微生物生产力及袁颖红等^[19] 通过模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响结论一致。这说明当地森林生态系统处于氮缺乏状态,适量施氮会促进地上部分植被生物量的增加,并相应增加了地上部分凋落物对土壤的输入量,有利于促进土壤微生物的生长,而高浓度氮肥持续添加可导致土壤酸化,产生“铝毒效应”抑制微生物的活动,进而影响土壤微生物碳、氮的含量^[12]。

本研究中,土壤微生物碳、氮在不同施氮处理下均随土层深度下降,土层间差异显著,这可能由于表层土壤中富含有机质,可为土壤微生物提供丰富的食物来源,因而在表层土壤中存在大量的真菌和藻类,随着土层深度的增加,土壤有机质含量减少(表 1),土壤容重增加,通气状况减弱,抑制了土壤微生物活动,这与以往研究^[13,20-21] 结果一致。

3.2 土壤微生物碳、氮的季节动态

土壤微生物碳、氮含量的季节性变动是一个动态、复杂的变化过程,在不同的森林生态系统,土壤微生物的季节变化也不尽相同^[20]。秋季大量凋落物落到土壤表层,为冬季土壤微生物提供大量的代谢底物。到春季后,随着气温逐渐回升,土壤微生物的活性开始增强,秋冬储存的“食物”逐渐耗竭,加之冻融引起的养分流失,导致土壤微生物生物量在 5 月初出现最低值。之后,由于春坝作用(早春植物和土壤微生物共同固持养分)^[22],植物恢复生长,导致 6 月土

壤微生物碳、氮含量逐渐增加,到 7 月达到峰值。在这一生长过程中,由于植物和土壤微生物生长都需要大量养分而对大量养分物质形成竞争关系^[23],使土壤微生物量产生变动而下降。到 8 月当地进入雨季,地上植被生长加速,使得土壤微生物碳、氮含量减少^[20],9—10 月因降水减少,凋落物的输入量增加,土壤微生物碳、氮逐渐增加。总体而言,华北落叶松人工林的土壤微生物碳、氮季节变化格局基本呈现“N”形,这种季节动态格局与以往在红松阔叶林^[24]、温带森林^[20]中的研究结果相似。

表 5 土壤养分、微生物碳、氮与土壤呼吸的相关性

指标	总有机碳	碳氮比	有机质	pH	含水量	土壤微生物碳	土壤微生物氮	土壤微生物碳氮比	土壤呼吸速率
全氮	0.683**	-0.100	0.719**	-0.391**	0.321*	0.361**	0.415**	0.092	0.364**
总有机碳		0.657**	0.876**	-0.212	0.453**	0.538**	0.575**	0.197	0.230
碳氮比			0.453**	0.119	0.310*	0.356**	0.342*	0.185	-0.050
有机质				-0.336*	0.386**	0.668**	0.761**	0.156	0.316*
pH					-0.066	-0.247	-0.316*	-0.021	-0.211
含水量						0.380**	0.092	0.488**	0.365**
土壤微生物碳							0.738**	0.650**	0.308**
土壤微生物氮								-0.025	0.439**
土壤微生物碳氮比									-0.027

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

3.3 土壤微生物碳氮比

土壤微生物碳氮比在一定程度上反映了土壤中真菌和细菌的相对比例,比值越高,真菌占比越大,土壤的固碳能力越高^[22]。有研究^[25]认为,土壤微生物碳氮比例为 4~15 时,真菌在微生物群落中占优势,3~5 时细菌占优势。本研究表明,微生物碳氮比为 4.94~18.54,说明华北落叶松人工林土壤中真菌占优势,这与王宁等^[24]研究结论一致。本研究发现,在重度施氮处理下,5—6 月碳氮比在不同土层均出现最低值,可能由于高氮处理下,土壤中细菌占优势,而真菌数量相对少,对土壤的腐殖化能力降低,从而减弱土壤的固碳能力。在对照样地中,土壤微生物碳氮比值 10.34~18.54,轻度施氮处理下为 7.9~13.21,重度施氮处理下为 4.94~13.32,说明随着施氮量的增加,土壤微生物碳氮比逐渐减小,这可能由于施氮量的增加,土壤 pH 降低,真菌和细菌对土壤酸化的敏感性可能是造成土壤微生物碳氮比下降的原因^[26],这与周世兴等^[12]在华西屏区天然常绿阔叶林中的研究结论相似。但也有研究^[13,27]发现,随着氮沉降量的增加,土壤微生物碳氮比增加的结论,这可能与不同区域的森林类型、施氮时间、施氮水平和施氮量有关。

3.4 施氮对土壤呼吸的影响

土壤呼吸是全球碳循环流通的关键环节之一,对大气 CO₂ 浓度、陆地生态系统具有重要的作用。外源施氮改变了土壤的氮素水平,也影响了土壤的呼吸

速率。本研究表明,轻度施氮处理促进了土壤呼吸,可能与该森林生态系统土壤的氮素本底值有关。外源施氮提高土壤有效氮含量,从而加强微生物对氮素的固定,提高细根对氮素的吸收利用率,加快土壤氮矿化过程,进而提高土壤的呼吸速率^[28],而重度施氮与对照相比降低了土壤呼吸,说明氮素供应水平对土壤呼吸的影响存在阈值反应^[29]。各氮处理下,华北落叶松人工林土壤呼吸速率 5 月和 6 月较低,7—8 月持续增加,并在 8 月达到最高,9—10 月土壤呼吸速率逐渐降低,这与曾清苹等^[30]的研究结果一致,即在模拟氮沉降下,柑橘林与马尾松林林下土壤表层呼吸表现为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季的变化动态趋势。

土壤微生物量和土壤呼吸作为反映土壤微生物特性的指标,是研究森林土壤碳排放的重要途径^[31]。本研究相关性分析结果表明,土壤呼吸与全氮、含水量、微生物碳和微生物氮呈极显著正相关关系,与土壤有机质呈显著正相关关系。在轻度施氮处理下,华北落叶松人工林下土壤微生物碳、氮和土壤呼吸均呈现出增加的趋势,而在重度施氮处理下,土壤微生物碳、氮和土壤呼吸出现降低趋势。

4 结论

华北落叶松人工林不同土层土壤微生物碳和氮对氮沉降的响应不一致,短期轻度施氮处理可促进土壤微生物碳和氮含量的增加,重度施氮处理会抑制土壤微生物碳和氮含量的增加。短期模拟氮沉降显著

降低表层和浅层的土壤微生物碳和碳氮比,提高表层和浅层土壤微生物氮,对中层土壤微生物碳和氮无显著影响。氮沉降并未改变华北落叶松人工林的生长季变化规律,但轻度施氮处理促进了土壤呼吸,重度施氮抑制了土壤呼吸。

参考文献:

- [1] Bouwman A F, Beusen A H W, Billen G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970—2050 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23: eGBOA04.
- [2] Yuan Z Y, Chen H Y H. Decoupling of nitrogen and phosphorus in terrestrial plants associated with global changes [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(5): 465-469.
- [3] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112 (D22): 112-121.
- [4] Ning Z, Peili S, Minghua S, et al. Nitrogen critical loads for an alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau [J]. *Environmental Management*, 2016, 57(3): 531-542.
- [5] Du E Z, Jiang Y, Fang J Y, et al. Inorganic nitrogen deposition in China's forests: Status and characteristics [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 98(24): 474-482.
- [6] 涂利华, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 华西雨屏区亮叶桦凋落叶分解对模拟氮沉降的响应[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(2): 99-108.
- [7] Torres I F, Bastida F, Hernández T, et al. The role of lignin and cellulose in the carbon-cycling of degraded soils under semiarid climate and their relation to microbial biomass [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 75(8): 152-160.
- [8] 王国兵, 阮宏华, 唐燕飞, 等. 北亚热带次生栎林与火炬松人工林土壤微生物生物量碳的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 37-42.
- [9] 李洪杰, 刘军伟, 杨林, 等. 海拔梯度模拟气候变暖对高山森林土壤微生物生物量碳氮磷的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 599-605.
- [10] 张娇, 郝龙飞, 王庆成, 等. 模拟氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. *植物研究*, 2016, 36(4): 596-604.
- [11] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤有机碳和养分的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 125-136.
- [12] 周世兴, 邹秤, 肖永翔, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 12-18.
- [13] 郭依秋, 范秀华, 汪金松, 等. 太岳山油松林土壤微生物量对模拟氮沉降的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(4): 605-610.
- [14] 洪丕征, 刘世荣, 于浩龙, 等. 模拟氮沉降对红椎人工幼龄林土壤微生物生物量和微生物群落结构的影响[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2016, 51(5): 18-28.
- [15] 涂玉, 尤业明, 孙建新. 油松—辽东栎混交林地表凋落物与氮添加对土壤微生物生物量碳、氮及其活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2325-2331.
- [16] 姚槐应, 黄昌勇. *土壤微生物生态学及其实验技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] 左强, 何怀江, 张春雨, 等. 采伐对蛟河阔叶红松混交林土壤呼吸的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4): 71-76.
- [18] Deforest J L, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 965-971.
- [19] 袁颖红, 樊后保, 李辉信, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响[J]. *林业科学*, 2012, 48(9): 8-14.
- [20] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [21] 邱甜甜, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原不同生长阶段油松人工林土壤微生物生物量碳的变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 681-687.
- [22] 王宁, 王美菊, 李世兰, 等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(5): 1297-1305.
- [23] Potila H, Sarjala T. Seasonal fluctuation in microbial biomass and activity along a natural nitrogen gradient in a drained peatland [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(7): 1047-1055.
- [24] 王宁, 杨雪, 李世兰, 等. 不同海拔红松混交林土壤微生物量碳、氮的生长季动态[J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 150-158.
- [25] Paul E A, Clark F E. *Soil microbiology and biochemistry* [M]. San Diego: Academic Press, 1996.
- [26] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1918-1927.
- [27] 赵玉涛, 韩士杰, 李雪峰, 等. 模拟氮沉降增加对土壤微生物量的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(1): 49-51.
- [28] Zhou L Y, Zhou X H, Zhang B C, et al. Different responses of soil respiration and its components to nitrogen addition among biomes: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2332-2343.
- [29] 李伟斌, 金昌杰, 井艳丽, 等. 长白山阔叶红松林土壤呼吸对氮沉降增加的响应[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(12): 89-93.
- [30] 曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 等. 重庆缙云山两种林分土壤呼吸对模拟氮沉降的季节响应差异性[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3244-3252.
- [31] 易海燕, 宫渊波, 伍维翰, 等. 岷江上游山地森林/干旱河谷交错带植被恢复对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 145-149.